



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**KOORDINASI JANGKA PENDEK PEMBANGKITAN  
*HYDROTHERMAL MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM***

Bobby Prayogo  
NRP 2214105039

Dosen Pembimbing  
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT - TE141599**

## **SHORT TERM HYDROTHERMAL COORDINATION GENERATION USING FIREFLY ALGORITHM**

Bobby Prayogo  
NRP 2214105039

Advisor  
Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

**KOORDINASI JANGKA PENDEK PEMBANGKITAN  
HYDROTHERMAL MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

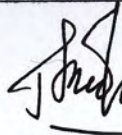
**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**Dosen Pembimbing II**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.**

**NIP. 197411292000121001**

**Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.**

**NIP. 196409011991032002**



**SURABAYA  
JUNI, 2016**

**ITS**  
Jurusan  
Teknik Elektro  
Sepuluh Nopember

## **Koordinasi Jangka Pendek Pembangkitan *Hydrothermal* menggunakan *Firefly Algorithm***

Nama Mahasiswa : Bobby Prayogo  
NRP : 2214105039  
Dosen Pembimbing I : Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Dosen Pembimbing II: Ir. Ni. Ketut Aryani, M.T.

### **ABSTRAK**

Pada saat ini koordinasi pembangkitan *hydrothermal* dengan cara yang paling ekonomis merupakan hal penting dalam sistem tenaga modern untuk memenuhi kebutuhan pasar energi. Koordinasi pembangkit *hydro* dan pembangkit *thermal* bertujuan untuk menentukan pola operasi unit pembangkit yang optimal dengan biaya total operasi yang minimal. Biaya total operasi ini diwakili oleh biaya pembangkitan *thermal* selama waktu optimisasi. Koordinasi pembangkitan *hydrothermal* memiliki konsep dasar yaitu memaksimalkan produksi pembangkit *hydro* dan meminimalkan biaya pembangkitan *thermal*, dengan menjamin keadaan dan pasokan daya secara ekonomis. Koordinasi ini dilakukan dengan mengatur pembangkitan dari masing - masing unit pembangkit. Unit pembangkit dengan biaya operasi paling murah dioperasikan untuk memikul beban dasar dari sistem, khususnya unit pembangkit *hydro*. Selanjutnya unit pembangkit *thermal* dengan biaya operasi yang lebih mahal dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan beban yang tersisa.

*Firefly Algorithm* digunakan untuk membantu melakukan koordinasi jangka pendek pembangkitan *hydrothermal*. Algoritma ini pertama-tama diterapkan pada pembangkit *hydro* untuk menghitung *hydro generation*, kemudian pada unit *thermal* untuk menghitung *economic load dispatch*. Sehingga diperoleh koordinasi pembangkitan *hydrothermal* yang optimum.

Simulasi dalam penelitian ini menggunakan sisten uji IEEE 30 bus. *Firefly algorithm* dapat diaplikasikan untuk melakukan koordinasi pembangkitan *hydrothermal* jangka pendek. Koordinasi ini mampu memenuhi batasan - batasan yang disepakati. *Volume* akhir yang diharapkan dapat terpenuhi untuk melakukan koordinasi di periode selanjutnya.

**Kata Kunci :** koordinasi *hydrothermal*, *economic dispatch*, *firefly*

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## ***Short Term Hydrothermal Coordination Generation using Firefly Algorithm***

Name : Bobby Prayogo  
NRP : 2214105039  
Advisor I : Dr. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Advisor II : Ir. Ni. Ketut Aryani, M.T.

### ***ABSTRACT***

*At this time the generation of hydrothermal coordination with the most economical way is important in modern power systems to meet the needs of the energy market. Coordination hydro plant and thermal power plant aims to determine the pattern of optimal operation of generating units with a total cost of operation is minimal. The total costs of this operation is represented by thermal generation cost during optimization. Coordination of hydrothermal generation has the basic concept is to maximize production of the hydro system and minimize the thermal generation costs, with the state guaranteeing the power supply and economically. Coordination is done by setting the generation of each generating unit. Generating units with the lower operating costs operated to carry the base load of the system, in this particular is hydro generation units. Furthermore, thermal generating units with higher operating costs operated to meet the needs of the remaining load.*

*Firefly Algorithm used to help coordinate the short term hydrothermal generation. First, this algorithm is applied to the hydro power plant to calculate hydro generation, then the thermal unit to calculate the economic load dispatch. In order to obtain optimum coordination of hydrothermal generation.*

*The simulation in this study using the test systems of IEEE 30 bus. Firefly algorithm can be applied to coordinate short-term hydrothermal generation. This coordination is able to meet the limits. The final volume is expected to be fulfilled for coordination in the next period.*

**Keywords** : coordination hydrothermal, economic dispatch, firefly

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

# DAFTAR ISI

<b>JUDUL</b>	i
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	iii
<b>PENGESAHAN</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>NOMENKLATUR</b> .....	
 <b>BAB I      PENDAHULUAN</b> .....	 1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Permasalahan .....	1
1.3. Tujuan Penelitian .....	2
1.4. Metode Penelitian.....	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
1.6. Relevansi.....	4
 <b>BAB II      KOORDINASI <i>HYDROTHERMAL</i></b> .....	 5
2.1. Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Generator.....	6
2.1.2 Transmisi.....	7
2.1.3 Distribusi .....	7
2.1.4 Beban .....	7
2.2. Karakteristik Unit Pembangkit.....	8
2.2.1 Karakteristik <i>Input-Output</i> Pembangkit <i>Thermal</i> ....	9
2.2.2 Karakteristik <i>Input-Output</i> Pembangkit <i>Hydro</i> .....	12
2.3. Koordinasi <i>Hydrothermal</i> .....	13
2.4. <i>Economic Dispatch</i> .....	14
 <b>BAB III      PENERAPAN <i>FIREFLY ALGORITHM</i> PADA                     KOORDINASI <i>HYDROTHERMAL</i></b> .....	 19
3.1. Koordinasi <i>Hydrothermal</i> .....	19
3.2. <i>Objective Function</i> dan <i>Constraints</i> .....	19
3.2.1 <i>Economic Scheduling</i> .....	19



3.2.2	<i>Constraints</i> .....	20
3.3.	<i>Firefly Algorithm</i> .....	23
3.3.1	Intensitas Cahaya dan Daya Tarik .....	24
3.4.	Koordinasi <i>Hydrothermal</i> menggunakan FA .....	25
3.4.1	Inisialisasi Awal FA .....	25
3.4.1.1	Sistem Uji IEEE 30 Bus .....	25
3.4.1.2	Pembangkitan Kandidat Calon Solusi .....	28
3.4.2	Operasi Pembangkitan <i>Hydro</i> .....	28
3.4.3	<i>Load Balance</i> .....	28
3.4.4	Operasi Pembangkitan <i>Thermal</i> .....	28
3.4.5	Evaluasi <i>Fitness Function</i> .....	29
3.4.6	Operasi <i>Firefly</i> .....	30
3.4.7	Hasil Koordinasi .....	31
3.4.7	<i>Flowchart</i> Koordinasi <i>Hydrothermal</i> .....	31
<b>BAB IV</b>	<b>SIMULASI DAN ANALISIS</b> .....	33
4.1.	Parameter - Parameter FA .....	33
4.2.	Performa Komputasi .....	33
4.3.	Hasil Simulasi .....	34
4.3.1.	Hasil Simulasi Kasus 1 .....	34
4.3.2.	Hasil Simulasi Kasus 2 .....	41
4.4.	Analisa Simulasi .....	48
4.4.1.	Analisa Simulasi Kasus 1 .....	49
4.4.2.	Analisa Simulasi Kasus 2 .....	56
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP</b> .....	
5.1.	Kesimpulan .....	63
5.2.	Saran .....	63
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	65
<b>INDEKS</b>	.....	67
<b>RIWAYAT HIDUP</b>	.....	71

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Sistem Tenaga Listrik Secara Umum .....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Karakteristik <i>Input-Output</i> Pembangkit <i>Thermal</i> .....	10
<b>Gambar 2.3</b>	Karakteristik Kenaikan Panas/Biaya Unit Pembangkit <i>Thermal</i> .....	11
<b>Gambar 2.4</b>	Karakteristik Pemakaian Panas Unit Pembangkit <i>Thermal</i> .....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Karakteristik <i>Input-Output</i> Pembangkit <i>Hydro</i> .....	12
<b>Gambar 2.6</b>	Karakteristik Kenaikan <i>Volume Input</i> Air Unit Pembangkit <i>Hydro</i> .....	13
<b>Gambar 2.7</b>	System <i>Hydrothermal</i> .....	13
<b>Gambar 3.1</b>	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Uji IEEE 30 Bus .....	26
<b>Gambar 3.2</b>	Kurva Pro fil Pembebanan Kasus 1 Selama 24 Jam..	27
<b>Gambar 3.3</b>	Kurva Pro fil Pembebanan Kasus 2 Selama 24 Jam..	27
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Flowchart</i> Koordinasi <i>Hydrothermal</i> Menggunakan <i>Firefly Algorithm</i> .....	32
<b>Gambar 4.1</b>	Kurva Konvergensi Koordinasi <i>Hydrothermal</i> FA Pada Kasus 1 .....	34
<b>Gambar 4.2</b>	Kurva Pembebanan dan Pembangkitan <i>Hydrothermal</i> Selama 24 Jam pada Kasus 1 .....	35
<b>Gambar 4.3</b>	Kurva <i>Water Discharges</i> Unit <i>Hydro</i> Selama 24 Jam pada Kasus 1 .....	36
<b>Gambar 4.4</b>	Kurva <i>Volume Reservoir</i> Unit <i>Hydro</i> Selama 24 Jam Pada Kasus 1 .....	37
<b>Gambar 4.5</b>	Kurva Konvergensi Koordinasi <i>Hydrothermal</i> FA Pada Kasus 2 .....	42
<b>Gambar 4.6</b>	Kurva Pembebanan dan Pembangkitan <i>Hydrothermal</i> selama 24 Jam Pada Kasus 2 .....	42
<b>Gambar 4.7</b>	Kurva <i>Water Discharges</i> Unit <i>Hydro</i> Selama 24 Jam Pada Kasus 2 .....	43
<b>Gambar 4.8</b>	Kurva <i>Volume Reservoir</i> Unit <i>Hydro</i> Selama 24 Jam Pada Kasus 2 .....	44

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Persamaan Parameter FA & Hydrothermal.....	25
<b>Tabel 3.2</b>	Unit Karakteristik Pembangkit <i>Hydro</i> .....	26
<b>Tabel 3.3</b>	Data Pembangkitan Unit <i>Thermal</i> .....	26
<b>Tabel 3.4</b>	Data Pembangkit Unit <i>Hydro</i> .....	26
<b>Tabel 3.5</b>	Total Pembebanan Kasus 1 .....	27
<b>Tabel 3.6</b>	Total Pembebanan Kasus 2 .....	27
<b>Tabel 4.1</b>	Settingan Parameter <i>Firefly Algorithm</i> .....	33
<b>Tabel 4.2</b>	Data Spesifikasi Komputasi .....	34
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil <i>Water Discharge Reservoir</i> Kasus 1.....	38
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil <i>Volume Storage Reservoir</i> Kasus 1.....	38
<b>Tabel 4.5</b>	Hasil Pembangkitan Unit <i>Hydro</i> Kasus 1 .....	39
<b>Tabel 4.6</b>	Hasil Optimasi Pembangkitan <i>Thermal</i> Kasus 1.....	40
<b>Tabel 4.7</b>	Hasil Biaya Pembangkit <i>Thermal</i> Kasus 1.....	40
<b>Tabel 4.8</b>	Hasil <i>Water Discharge Reservoir</i> Kasus 2.....	45
<b>Tabel 4.9</b>	Hasil <i>Volume Storage Reservoir</i> Kasus 2.....	45
<b>Tabel 4.10</b>	Hasil Pembangkitan Unit <i>Hydro</i> Kasus 2 .....	46
<b>Tabel 4.11</b>	Hasil Optimasi Pembangkitan <i>Thermal</i> Kasus 2.....	47
<b>Tabel 4.12</b>	Hasil Biaya Pembangkit <i>Thermal</i> Kasus 2.....	48
<b>Tabel 4.13</b>	Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit <i>Hydro</i> pada Kasus 1.....	49
<b>Tabel 4.14</b>	Analisa Batasan <i>Water Discharges</i> Kasus 1.....	50
<b>Tabel 4.15</b>	Analisa Kesesuaian Air pada Kasus 1.....	50
<b>Tabel 4.16</b>	Analisa Batasan <i>Volume Storage Reservoir</i> 1&2 .....	51
<b>Tabel 4.17</b>	Analisa Batasan <i>Volume Storage Reservoir</i> 3.....	52
<b>Tabel 4.18</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 1&2.....	53
<b>Tabel 4.19</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 3&4.....	54
<b>Tabel 4.20</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 5&6.....	55
<b>Tabel 4.21</b>	Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit <i>Hydro</i> pada Kasus 2.....	56
<b>Tabel 4.22</b>	Analisa Batasan <i>Water Discharges</i> Kasus 2.....	57
<b>Tabel 4.23</b>	Analisa Kesesuaian Air pada Kasus 2.....	57
<b>Tabel 4.24</b>	Analisa Batasan <i>Volume Storage Reservoir</i> 1&2 .....	58
<b>Tabel 4.25</b>	Analisa Batasan <i>Volume Storage Reservoir</i> 3.....	59
<b>Tabel 4.26</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 1&2.....	60
<b>Tabel 4.27</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 3&4.....	61
<b>Tabel 4.28</b>	Analisa Batasan Pmax Pmin <i>Thermal</i> 5&6.....	62

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## NOMENKLATUR

\$	: <i>Dollar.</i>
AC	: <i>Alternating Current.</i>
$a_i, b_i, c_i$	: Koefisien <i>fuel cost</i> unit <i>thermal</i> (i).
$a_j, b_j$	: Koefisien pembangkitan unit <i>hydro</i> (j) .
ANSI	: <i>American National Standards Institute.</i>
DC	: <i>Direct Current.</i>
DED	: <i>Dynamic Economic Dispatch.</i>
E	: Energi.
ED	: <i>Economic Dispatch.</i>
error ( $X_i^k$ )	: Strategi untuk <i>reservoir constraint</i> calon solusi (i). pada iterasi (k).
error <sub>j</sub>	: Startegi untuk memenuhi <i>reservoir constraint</i> .
F	: Biaya pembangkitan pembangkit <i>thermal</i> .
$F(X_i^k)$	: Total <i>fuel cost</i> calon solusi (i) pada iterasi (k).
FA	: Firefly Algorithm.
$f_i(P_{si,t})$	: <i>Fuel cost</i> unit <i>thermal</i> (i) pada waktu (t).
fitness ( $X_i^k$ )	: Kelayakan calon solusi (i) pada iterasi (k).
GA	: <i>Genetic Algorithm.</i>
GB	: <i>Giga Byte.</i>
Ghz	: <i>Gigahertz.</i>
H	: Btu per jam <i>input</i> panas pada unit (Mbtu/h).
I	: <i>Water In Flow.</i>
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
$I_{hj,t}$	: <i>Water in flow</i> unit <i>hydro</i> (j) pada waktu (t).
$I_s$	: Intensitas cahaya <i>firefly</i> paling terang.
k	: Iterasi.
$k_{max}$	: Iterasi maksimum.
$m^3$	: meter kubik.
Matlab	: <i>Matrix Laboratory.</i>
MBtu/h	: Mega kalori tiap jam dari generator.
M-File	: <i>Matrix Laboratory File.</i>
MW	: <i>Mega Watt.</i>
P	: Daya aktif
$P_{D,t}$	: Daya aktif pembebanan pada waktu (t).
$P_{hi,t}$	: Pembangkitan unit <i>hydro</i> (j) pada waktu (t).
$P_{hi}^{max}$	: Batas maksimum pembangkitan unit <i>hydro</i> (j).

$P_{hi}^{mn}$	: Batas minimum pembangkitan unit <i>hydro</i> (j).
$P_{max}$	: Pembangkitan daya aktif maksimum.
$P_{min}$	: Pembangkitan daya aktif minimum.
$P_{si,t}$	: Pembangkitan unit <i>thermal</i> (i) pada waktu (t).
$P_{si}^{max}$	: Batas maksimum pembangkitan unit <i>thermal</i> (i).
$P_{si}^{mn}$	: Batas minimum pembangkitan unit <i>thermal</i> (i).
PSO	: <i>Particle Swarm Optimization</i> .
punish(k)	: Faktor pengali ketika <i>constraint</i> dilanggar pada iterasi (k).
Q	: Debit air yang keluar untuk pembangkitan.
$Q_{hi,t}$	: <i>Water discharge</i> unit <i>hydro</i> (j) pada waktu (t).
$Q_{hj}^{max}$	: Batas maksimum <i>water discharge</i> unit <i>hydro</i> (j).
$Q_{hi}^{mn}$	: Batas minimum <i>water discharges</i> unit <i>hydro</i> (j).
$Q_{max}$	: <i>Water discharge</i> maksimum.
$Q_{min}$	: <i>Water discharge</i> minimum.
r	: Jarak antara dua titik.
R/h	: Rupiah per jam.
RAM	: <i>Random Access Memory</i> .
RPM	: Rotasi per menit atau revolusi per menit.
T	: Periode dalam interval waktu.
V	: Tegangan.
$V_{fin}$	: <i>Volume</i> akhir <i>reservoir</i> .
$V_{hi,t}$	: <i>Volume reservoir</i> unit <i>hydro</i> (j) pada waktu (t).
$V_{hj}^{akhir}$	: <i>Volume</i> akhir <i>reservoir</i> (j).
$V_{hi}^{awal}$	: <i>Volume</i> awal <i>reservoir</i> (j).
$V_{hj}^{max}$	: Batas minimum <i>volume reservoir</i> unit <i>hydro</i> (j).
$V_{hi}^{mn}$	: Batas maksimum <i>volume reservoir</i> unit <i>hydro</i> (j).
$V_{ini}$	: <i>Volume</i> initial <i>reservoir</i> .
$\alpha$	: Koefisien pengacakan.
$\beta$	: Koefisien perpindahan.
$\beta_0$	: Koefisien daya tarik awal.
$\gamma$	: Koefisien penyerapan cahaya.
$\varepsilon_i$	: Vektor distribusi Gaussian.



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada saat ini koordinasi pembangkitan *hydrothermal* dengan cara yang paling ekonomis merupakan hal penting dalam sistem tenaga modern untuk memenuhi kebutuhan dalam pasar energi. Koordinasi pembangkit *hydro* dan pembangkit *thermal* bertujuan untuk menentukan pola operasi unit pembangkit yang optimal dengan biaya total operasi yang minimal. Biaya total operasi ini diwakili oleh biaya pembangkitan *thermal* selama waktu optimisasi. Koordinasi pembangkitan *hydrothermal* memiliki konsep dasar yaitu memaksimalkan produksi pembangkit *hydro* dan meminimalkan produksi pembangkit *thermal*, sehingga menjamin keadaan dan pasokan daya secara ekonomis. Koordinasi ini dilakukan dengan mengatur pembangkitan dari masing - masing unit pembangkit. Unit pembangkit dengan biaya operasi paling murah dioperasikan untuk memikul beban dasar dari sistem, khususnya unit pembangkit *hydro*. Selanjutnya unit pembangkit *thermal* dengan biaya operasi yang lebih mahal dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan beban yang tersisa.

*Firefly Algorithm* digunakan untuk membantu melakukan koordinasi jangka pendek pembangkitan *hydrothermal*. Algoritma ini pertama-tama diterapkan pada pembangkit *hydro* untuk menghitung *hydro generation*, kemudian pada unit *thermal* untuk menghitung *economic load dispatch*. Sehingga diperoleh penjadwalan *hydrothermal* yang optimum.

Dalam Tugas Akhir ini, dengan menggunakan *firefly algorithm* diharapkan dapat memberikan hasil optimisasi yang optimal dalam koordinasi pembangkitan *hydrothermal*. Simulasi dalam penelitian ini menggunakan sistem uji IEEE 30 bus. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi referensi untuk pihak - pihak yang terkait dalam melakukan pengoperasian pembangkit *hydrothermal*, guna mendapatkan tingkat keekonomisan pembangkitan yang optimal.

### 1.2 Permasalahan

Pada Tugas Akhir ini yang menjadi permasalahan adalah mendapatkan hasil koordinasi jangka pendek pembangkitan

*hydrothermal* menggunakan metode *firefly algorithm* dengan mempertimbangkan batasan - batasan yang disepakati.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkoordinasikan pembangkit *hydrothermal* dengan menggunakan metode *firefly algorithm*. Koordinasi ini dilakukan dengan memaksimalkan pembangkitan *hydro* sehingga dapat meminimalkan biaya pembangkitan *thermal*. Hasilnya merupakan nilai pembangkitan masing - masing unit baik unit *hydro* maupun unit *thermal* selama 24 jam dalam selang waktu satu jam.

### 1.4 Metode Penelitian

Pada Tugas Akhir ini dilakukan penelitian tentang koordinasi pembangkitan *hydrothermal* dengan profil beban selama dua puluh empat jam. Untuk mendapatkan koordinasi pembangkitan dengan biaya pembangkitan yang ekonomis akan digunakan *firefly algorithm* sebagai metode penyelesaian. Data yang digunakan dalam Tugas Akhir ini meliputi fungsi biaya pembangkitan, pembangkitan maksimum dan minimum, *volume* air pada *reservoir*, air yang masuk dalam *reservoir* per jam, batasan-batasan unit pembangkit, serta jumlah beban selama rentang waktu dua puluh empat jam dalam *interval* satu jam. Perhitungan operasi koordinasi akan disimulasikan pada M-File dalam *Matlab*. Tahapan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. Studi Literatur  
Literatur yang digunakan berasal dari *journal*, *proceeding*, dan *text book* yang terkait dengan *firefly algorithm* dan koordinasi *hydrothermal*.
2. Pengumpulan Data  
Data yang dibutuhkan berupa *volume* air pada *reservoir*, *volume* air yang masuk dalam *reservoir* per jam, fungsi biaya pembangkitan, dan rentang daya pembangkitan untuk masing-masing pembangkit, serta beban dalam rentang waktu dua puluh empat jam dengan *interval* satu jam.
3. Pembuatan Program  
Pembuatan program dalam bentuk M-File pada *Matlab* menerapkan metode *firefly algorithm* untuk mendapatkan hasil koordinasi *hydrothermal*.

#### 4. Simulasi dan Analisis

Simulasi dilakukan menggunakan sistem uji IEEE 30 bus dimana terdapat enam pembangkit *thermal* dan tiga pembangkit *hydro*. Data yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut akan dianalisis untuk mengetahui keberhasilan dan keefektifan algoritma yang diusulkan.

#### 5. Penulisan Laporan

Penulisan laporan dilakukan sebagai pertanggungjawaban dan penggambaran kesimpulan dari Tugas Akhir. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

### 1.5 Sistematika Laporan

Dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini, pembahasan mengenai sistematika laporan dibagi menjadi lima bab, sebagai berikut :

#### **Bab I : PENDAHULUAN**

Dalam bab ini mendiskripsikan tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika laporan, serta relevansi penulisan Tugas Akhir.

#### **BAB II : KOORDINASI HYDROTHERMAL**

Bab ini berisi tentang teori penunjang yang merupakan penjelasan mengenai koordinasi *hydrothermal*, *economic dispatch*, karakteristik *input-output* unit pembangkit.

#### **BAB III : PENERAPAN FIREFLY ALGORITHM PADA KOORDINASI HYDROTHERMAL**

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai penerapan algoritma kunang - kunang atau *firefly algorithm* pada koordinasi pembangkitan *hydrothermal*.

#### **BAB IV : SIMULASI DAN ANALISIS**

Bab ini berisi hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* selama 24 jam menggunakan *firefly algorithm* serta analisis biaya pembangkitan.

#### **BAB V : PENUTUP**

Dalam bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari pembuatan Tugas Akhir dan saran-saran untuk pengembangan lebih lanjut.

## **1.6 Relevansi**

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dapat diambil manfaat seperti berikut :

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem tenaga listrik khususnya pada permasalahan yang mengenai koordinasi *hydrothermal* dan penerapan *firefly algorithm*.
2. Dapat menambah penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang operasi sistem tenaga listrik bagi penulis.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir dengan permasalahan yang serupa.

## BAB 2

### KOORDINASI *HYDROTHERMAL*

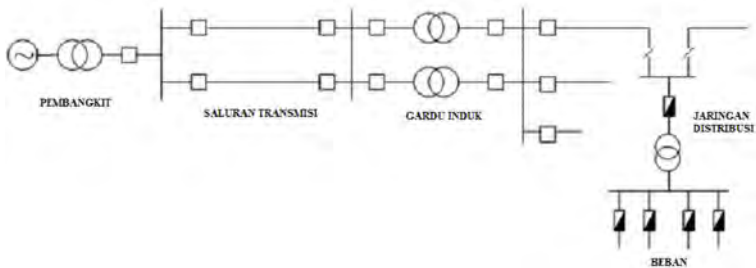
Pada bab ini dijelaskan mengenai teori - teori yang menunjang penyelesaian koordinasi jangka pendek pembangkitan *hydrothermal* menggunakan metode *firefly algorithm*.

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkit sampai konsumen.

Sistem tenaga listrik merupakan saluran terinterkoneksi yang dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu unit pembangkit, transmisi, distribusi, dan beban tenaga listrik. Unit-unit pembangkit tenaga listrik dengan lokasi berjauhan satu sama lain terhubung pada sistem melalui sistem transmisi yang luas untuk menyuplai energi listrik pada beban yang tersebar. Sistem interkoneksi menyebabkan :

1. Keandalan sistem yang semakin tinggi.
2. Efisiensi pembangkitan tenaga listrik dalam sistem meningkat.
3. Mempermudah koordinasi antar pembangkit.



**Gambar 2.1** Sistem Tenaga Listrik Secara Umum.

Secara umum sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain :

1. Pembangkit
2. Transmisi
3. Distribusi
4. Beban / Konsumen

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke konsumen dapat digambarkan seperti gambar 2.1. Pada gambar sudah mencakup ketiga unsur dari empat komponen utama sistem tenaga listrik.

Sebuah sistem tenaga listrik menjadi sebuah unit usaha yang sangat memperhatikan faktor teknis dan ekonomis dalam hal pengoperasian. Pada sistem tenaga listrik selalu dijaga kondisi seimbang antara pemasukan dan pengeluaran (pembiayaan) agar dapat diperoleh keuntungan yang diharapkan, sehingga kelangsungan unit usaha dapat dijaga dan meningkatkan kualitas serta kapabilitas unit usaha.

Dengan terhubung dengan banyak pembangkit ke dalam sebuah sistem interkoneksi memberikan kemungkinan pengaturan daya listrik yang terbangkitkan pada setiap unit pembangkit, dan biaya pembangkitan dapat diatur pada tingkat yang ekonomis.

### **2.1.1 Generator**

Salah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik adalah generator AC sinkron tiga fasa. Generator sinkron mempunyai dua medan putar yang sinkron, satu medan diproduksi oleh rotor pada kecepatan sinkron dan memperoleh eksitasi dari arus DC, dan medan lain diproduksi pada kumparan stator oleh arus armatur tiga fasa.[4]

Sistem kelistrikan modern secara umum menggunakan generator AC dengan sistem eksitasi *brushless*. Sumber tenaga mekanik yang menggerakkan generator berasal dari tenaga mekanik turbin. Salah satu jenis turbin adalah turbin uap, turbin uap digerakkan oleh energi yang dihasilkan dari pembakaran batubara, gas, atau bahan bakar nuklir.[4]

Turbin uap beroperasi pada kecepatan 3600 atau 1800 rpm. Generator yang dapat dikopel adalah generator dengan rotor silinder, dua kutub untuk 3600 rpm atau empat kutub 1800 rpm. Turbin hidrolik yang beroperasi pada tekanan rendah, dan kecepatan yang rendah menggunakan generator tipe *salient* rotor dengan banyak kutub. Pada suatu sistem tenaga listrik, generator dioperasikan secara paralel untuk menyediakan permintaan beban yang dibutuhkan dan menjaga kualitas energi listrik yang terbangkitkan.[4]

### **2.1.2 Transmisi**

Transmisi tenaga listrik merupakan proses menyalurkan energi listrik dari unit pembangkit menuju sistem dalam rangka menyuplai beban. Saluran transmisi juga bertujuan menghubungkan peralatan

selama sistem bekerja normal, maupun ketika terjadi gangguan pada suatu sistem tenaga listrik. Selain itu, pada beberapa unit usaha besar seperti industri-industri yang mempunyai pabrik berkapasitas tinggi, memperoleh suplai langsung dari saluran transmisi.

Standar tegangan transmisi dikeluarkan oleh *United States* dalam standar ANSI (*American National Standards Institute*). Tegangan transmisi dioperasikan lebih dari 60 kV, yaitu dengan standar satuan 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, and 765 kV *line-to-line*. [4]

### 2.1.3 Distribusi

Sistem distribusi adalah bagian yang menghubungkan gardu induk distribusi pada konsumen. Besar tegangan saluran distribusi *primer* yaitu 4 kV sampai dengan 34.5 kV dan menyuplai beban dalam area tertentu. Beberapa industri kecil langsung mendapat suplai listrik dari penyulang *primer*.

Jaring distribusi sekunder dapat mengurangi tegangan pada peralatan konsumen. Saluran dan kabel listrik tidak boleh melebihi panjang beberapa ratus *feet*. Distribusi sekunder menyuplai tegangan kepada konsumen dengan *level* tegangan 240/120 V, fasa tunggal dengan tiga kawat; 208/120 V tiga fasa, empat kawat; 480/277 V, tiga fasa, empat kawat.

Berdasarkan letak, sistem distribusi dibagi menjadi dua yaitu, *Overhead* dan *Underground*. *Overhead* merupakan kabel atau kawat transmisi listrik disalurkan di udara atau di atas tanah, sedangkan *Underground* adalah transmisi listrik terletak di bawah tanah.

### 2.1.4 Beban

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi listrik ini dibagi dalam beberapa sektor, yaitu sektor perumahan, sektor industri, dan sektor komersil. Setiap sektor beban mempunyai karakteristik yang berbeda, sebab berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing - masing konsumen pada sektor tersebut.

Karakteristik beban pada sektor perumahan ditunjukkan oleh fluktuasi konsumsi energi listrik yang cukup besar karena konsumsi energi listrik yang dominan pada malam hari dan rendah pada siang hari. Pada sektor industri fluktuasi konsumsi energi listrik sepanjang hari relatif kecil, sehingga selisih antara beban puncak terhadap beban rata - rata mendekati nilai nol. Untuk beban pada sektor komersil mempunyai



karakteristik yang hampir sama dengan karakteristik beban perumahan, mempunyai beban yang lebih tinggi pada malam hari daripada siang hari.

Pada sistem tenaga modern jika beban industri sangat besar, maka akan disuplai oleh sistem transmisi secara langsung dari jaring subtransmisi, sedangkan beban industri yang tergolong kecil maka akan disuplai oleh jaring distribusi primer. Beban industri merupakan beban campuran, dan beban yang mendominasi adalah beban dari motor listrik. Beban campuran akan mempengaruhi nilai dari frekuensi tegangan dan nilai daya reaktif. Berbeda dengan beban industri, beban komersial dan beban rumah tangga secara umum terdiri dari beban untuk pencahayaan, pemanasan, dan pendinginan. Beban-beban tersebut berpengaruh kecil terhadap frekuensi dan nilai konsumsi daya reaktif sehingga sering diabaikan dalam perhitungan.

## 2.2 Karakteristik Unit Pembangkit

Masalah paling dasar dari operasi ekonomi pada suatu unit pembangkit adalah karakteristik *input-output*. Sebuah unit pembangkit *thermal* beroperasi dalam kendali turbin yang didorong oleh uap pada tekanan tinggi yang dihasilkan dari *boiler*. *Output* daya generator tidak hanya disalurkan untuk jala-jala, tetapi juga untuk menyuplai peralatan *plant* pembangkit tersebut, seperti kipas pendingin, pompa air umpan dan lain-lain. Dalam mendefinisikan karakteristik suatu unit, pasti akan memperhitungkan perbandingan *input* kotor dengan *output* bersih. *Input* kotor dapat diukur dengan dolar per jam atau ton batubara per jam atau besaran yang lain. Dengan demikian, karakteristik generator yang menggunakan turbin uap didefinisikan sesuai dengan masukan panas yang diperlukan atau total biaya.

Perbedaan karakteristik unit pembangkit menyebabkan posisi pembangkit dalam mensuplai beban suatu sistem tenaga listrik menjadi berbeda. Secara umum jenis - jenis posisi pembangkit dalam sistem adalah pembangkit pemikul beban dasar (*base load*), pemikul beban menengah (*load follower*) dan pemikul beban puncak (*peaker*).

Pembangkit dengan karakteristik yang kurang fleksibel yaitu pembangkit yang tidak dapat dihidupkan atau dimatikan dalam waktu singkat dan lambat dalam menaikkan atau menurunkan pembebanan mengharuskan pembangkit untuk dioperasikan sepanjang pembangkit siap. Pembangkit kelompok ini digolongkan ke dalam pembangkit *base load*. Pembangkit *base load* berskala besar dan memiliki biaya produksi

yang lebih murah dibandingkan kelompok pembangkit lain. Pembangkit *base load* dioperasikan pada kapasitas terpasang maksimum sepanjang pembangkit tersebut siap serta sesuai dengan kesiapan sistem penyaluran.

Pembangkit kelompok *load follower* meliputi pembangkit yang lebih fleksibel namun lebih mahal dan pembangkit *base load*. Pembangkit yang difungsikan sebagai pemikul beban puncak meliputi pembangkit yang fleksibel baik dalam kecepatan perubahan pembebanan maupun operasi hidup dan mati pembangkit.

### **2.2.1 Karakteristik *Input - Output* Pembangkit *Thermal***

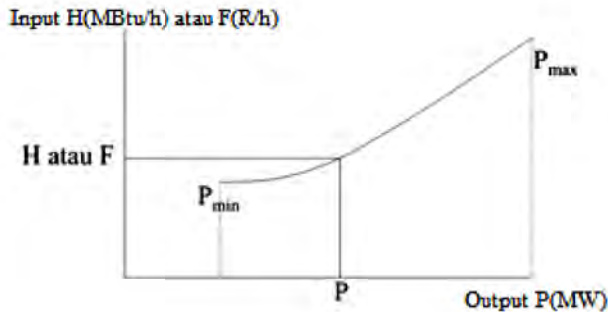
Pada pembangkit *thermal*, karakteristik *input - output* konsumsi bahan bakar pembangkit merupakan dasar penyusunan fungsi biaya. Secara umum karakteristik *input - output* pembangkit *thermal* berbentuk *Btu per hour input* ke unit generator (*MBtu/h*). Biaya pembangkitan adalah perkalian dari biaya (\$) kalori yang terkandung dalam bahan bakar dengan kebutuhan kalori tiap jam dari generator (*Btu/h*). Hasil daya yang dibangkitkan (*Mega Watt*) direpresentasikan dengan  $P_G$ . Pada gambar 2.2 ditunjukkan bahwa kurva karakteristik *input - output* dari pembangkit *thermal* memiliki batas minimal dan maksimal dari daya *output* yang diproduksi.

Selain biaya bahan bakar yang dikonsumsi, biaya operasi juga meliputi biaya tenaga kerja, biaya pemeliharaan, biaya transportasi bahan bakar, dan lain - lain. Biaya - biaya tersebut sulit direpresentasikan secara langsung sebagai fungsi biaya dari daya *output* yang dihasilkan generator. Karena permasalahan tersebut, biaya - biaya tersebut diasumsikan sebagai bagian *fixed cost* dari biaya operasi.

Pembangkit *thermal* sederhana terdiri dari *boiler*, turbin uap, dan generator. *Input* dari *boiler* adalah bahan bakar dan *output* berupa uap. Hubungan dari *input - output boiler* dapat direpresentasikan dalam bentuk *convex curve*. *Input* dari turbin adalah sejumlah uap dan *output* adalah daya listrik. Karakteristik dari keseluruhan sistem suatu pembangkit dapat direpresentasikan secara langsung dengan menggabungkan karakteristik *input - output* dari *boiler* dan turbin generator.

Batas minimum dari daya *output* generator diperhatikan, hal ini disebabkan karena kondisi teknis atau faktor lain pada *boiler* dan turbin. Pada turbin, kondisi teknis yang dimaksud adalah kondisi *shell* serta perbedaan suhu metal rotor, *exhaust hood temperature*, *rotor expansion*,

dan *shell expansion*. Pada *boiler*, kondisi teknis tersebut disebabkan karena *fuel combustion stability and valve*. Sedangkan batas maksimal dari daya *output* suatu pembangkit ditentukan dari desain kapasitas *boiler* dan turbin generator.



**Gambar 2.2** Karakteristik *Input - Output* Pembangkit Thermal (*ideal*).[1]

Karakteristik *input - output* diekspresikan dalam persamaan yang merupakan pendekatan atau linearisasi dari biaya bahan bakar yang masuk ke generator terhadap daya *output* generator yang diperoleh berdasarkan beberapa cara, antara lain :

1. Berdasarkan percobaan tentang efisiensi dari pembangkit.
2. Berdasarkan data historis mengenai operasi dari unit generator.
3. Berdasarkan pada data desain dari unit generator yang diberikan oleh pabrik pembuat generator.
4. Sudah ditentukan pada penelitian sebelumnya.

Persamaan karakteristik yang diperoleh disebut sebagai biaya pembangkitan energi listrik dari suatu pembangkit. Persamaan karakteristik *input - output* pembangkit *thermal* secara umum direpresentasikan dalam persamaan orde dua. Tetapi persamaan tersebut dapat juga memiliki orde lebih dari dua dan bisa menjadi lebih tidak linier (*non-convex*) apabila perhitungan yang lebih sensitif dibutuhkan dengan memperhatikan pengaruh - pengaruh seperti *valve point effect*.

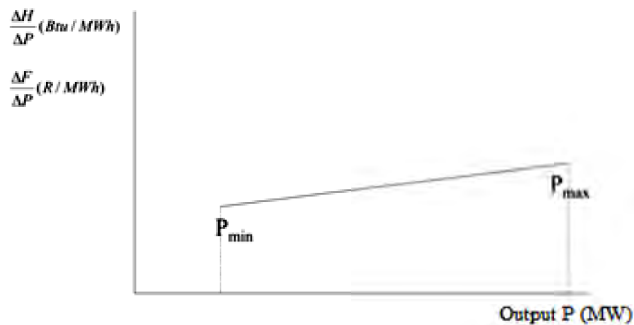
Untuk menganalisis permasalahan mengenai operasi dalam sistem tenaga, terutama masalah operasi ekonomis, dibutuhkan dasar mengenai karakteristik *input - output* dari suatu unit pembangkit *thermal*. Untuk mendefinisikan karakteristik unit.

*Gross input* dari suatu pembangkit merepresentasikan total *input* dan diukur dalam dolar per jam, atau ton bahan bakar per jam atau kubik gas per jam atau bentuk unit yang lain. Sedangkan *net output* dari suatu pembangkit adalah *output* daya listrik yang tersedia untuk penggunaan pada sistem tenaga.

Dalam mendefinisikan karakteristik dari unit turbin uap digunakan beberapa konstanta sebagai berikut :

H = Btu per jam *input* panas pada unit (Mbtu/h)

F = Biaya bahan bakar dikalikan H adalah R per jam (R/h) *input* pada unit untuk bahan bakar.

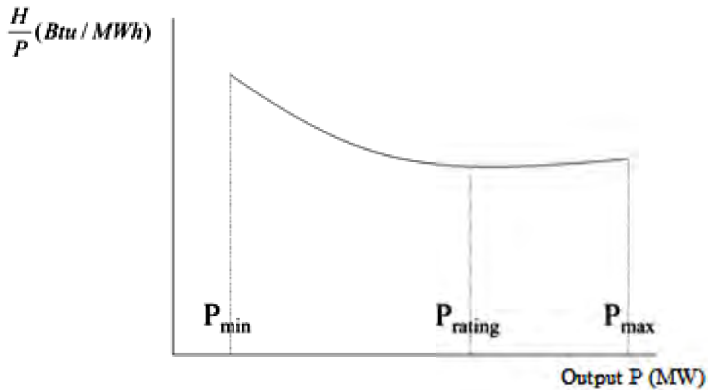


**Gambar 2.3** Karakteristik Kenaikakan Panas/Biaya unit Pembangkit *Thermal (ideal)*. [1]

Biaya operasional R per jam suatu unit terdiri dari biaya operasional dan biaya pemeliharaan. Sehingga biaya pekerja akan dimasukan sebagai bagian dari biaya operasi jika biaya ini dapat digambarkan secara langsung sebagai fungsi dari *output* unit. *Output* dari unit pembangkit dinotasikan dengan P.

Karakteristik kenaikan panas dari unit pembangkit uap diperlihatkan pada gambar 2.3. Karakteristik ini adalah kemiringan dari karakteristik *input - output*. Data yang ditunjukkan pada kurva ini dalam satuan Btu per kiloWatt jam ( R per kilowatt jam).

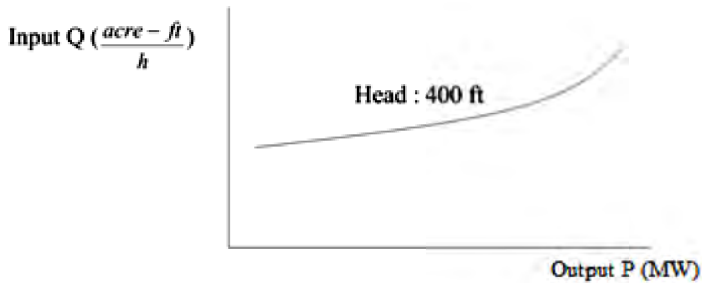
Karakteristik yang terakhir adalah karakteristik pemakaian panas suatu unit, seperti yang ditunjukkan gambar.



**Gambar 2.4** Karakteristik Pemakaian Panas unit Pembangkit *Thermal (ideal)*. [1]

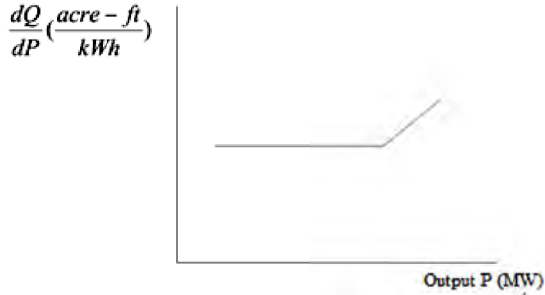
### 2.2.2 Karakteristik *Input - Output* Pembangkit *Hydro*

Unit pembangkit *hydro* mempunyai karakteristik *input - output* mirip dengan unit pembangkit *thermal*. *Input* adalah *volume* air persatuan waktu dan *output* daya listrik. Gambar 2.5 menunjukkan kurva *input - output* untuk pembangkit tenaga air dengan *head* tetap.



**Gambar 2.5** Karakteristik *Input - Output* unit Pembangkit *Hydro*. [1]

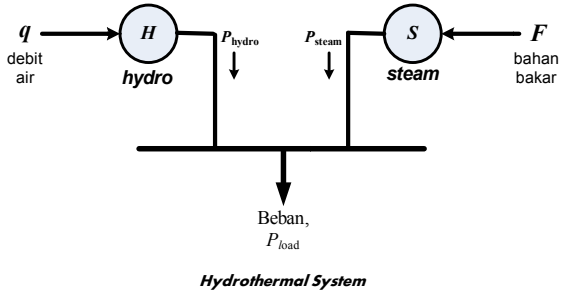
Karakteristik kenaikan *volume input* air per satuan waktu sebagai fungsi dari daya *output* menunjukkan kurva yang hampir *linier* dengan daya *output* yang bertambah dari minimum ke beban nominal. Karakteristik ini ditunjukkan pada gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Karakteristik Kenaikan *Volume Input* Air unit Pembangkit *Hydro*. [1]

### 2.3 Koordinasi *Hydrothermal*

Koordinasi *hydrothermal* yang sederhana dimisalkan seperti dua buah sumber energi listrik yang memasok beban, satu berasal dari *hydro* dan satu lainnya berasal dari *steam*, seperti ditunjukkan pada gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Sistem *Hydrothermal*. [2]

*Hydroplant* dapat memasok beban sendirian untuk waktu terbatas. Untuk beberapa periode  $j$ , seperti ditunjukkan pada persamaan 2.1.

$$P_{Hydro,j}^{max} \geq P_{Load,j} \quad j = 1 \dots j_{max}. \quad (2.1)$$

Energi tersedia dari *hydroplant* untuk beban, seperti persamaan 2.2.

$$\sum_{j=1}^{jmax.} P_{Hydro,j} n_j \leq \sum_{j=1}^{jmax.} P_{Load,j} n_j$$

$n_j = \text{jumlah jam dalam periode } j$

(2.2)

Semua energi dari *hydroplant* dapat digunakan sedemikian rupa sehingga biaya untuk *steam plant* (pembangkit uap) menjadi minimal. Energi dari *steamplant* ditentukan oleh persamaan 2.3.

$$\sum_{j=1}^{jmax.} P_{Load,j} n_j - \sum_{j=1}^{jmax.} P_{Hydro,j} n_j = E$$

(2.3)

$$\begin{aligned} & (\text{Energi dibutuhkan Beban}) - (\text{Energi dari Hydroplant}) \\ & = (\text{Energi dari Steam plant}) \end{aligned}$$

Energi dari pembangkit uap ini yang berkewajiban mencukupi kebutuhan beban namun dengan biaya seminim mungkin. Sehingga ditentukan dalam persamaan 2.4.

$$Min. F_T = \sum_{j=1}^{N_{Steam}} F(P_{Steam,j}) n_j$$

(2.4)

Hal ini mempunyai arti, bahwa *steam plant* akan beroperasi pada nilai  $\alpha$  (*incremental cost*) yang tetap untuk periode penuh saat beroperasi. Nilai optimum untuk daya yang dibangkitkan pembangkit uap yaitu  $P_{Steam}^*$  yang sama dengan interval waktu pembangkit uap beroperasi.

## 2.4 Economic Dispatch

*Economic Dispatch* (ED) adalah pembagian pembebanan pada pembangkit - pembangkit yang ada dalam sistem secara optimal ekonomi, pada harga beban sistem tertentu. Besar beban pada suatu sistem tenaga selalu berubah setiap periode waktu tertentu, oleh karena itu untuk mensuplai beban secara ekonomis maka perhitungan ED dilakukan pada setiap besar beban tersebut.

Ada beberapa metode dalam menyelesaikan permasalahan ED, antara lain faktor pengali *Langrange*, iterasi *lambda*, *base point*, faktor partisipasi, dan lainnya. Pengoptimalan model biaya dari pembangkitan

energi listrik sangat penting. Pengoptimalan permasalahan ED pada Tugas Akhir ini menggunakan komputer untuk melakukan kalkulasi. Parameter - parameter tersebut sangat penting untuk melakukan perancangan dari sistem, penentuan porsi biaya bahan bakar dan menejemen operasi pada pembangkitan.

Pada pembangkitan energi listrik, terdapat tiga komponen biaya utama yaitu biaya pembangunan fasilitas, biaya kepemilikan, dan biaya operasi. Biaya operasi adalah biaya yang memiliki bagian yang paling dominan pada sistem operasi tenaga listrik.

Salah satu komponen dominan pada biaya operasi adalah biaya bahan bakar (*fuel cost*) dan setiap pembangkit memiliki karakteristik *fuel cost* yang berbeda - beda sesuai dengan jenis bahan bakar dan efisiensi dari pembangkit. Pengoptimalan biaya operasi dengan mempertimbangkan *fuel cost* sangat mempengaruhi biaya produksi energi listrik. Oleh sebab itu, penjadwalan kerja pembangkit tetap menjadi prioritas untuk menekan biaya produksi.

Tujuan utama dari *economic dispatch* adalah meminimalkan konsumsi bahan *economic dispatch* dari pembangkit pada keseluruhan sistem dengan menentukan daya *output* setiap unit pembangkit. Penentuan daya *output* pada setiap generator hanya boleh bervariasi pada batas - batas tertentu.

#### 2.4.1 Persamaan Matematis Permasalahan *Economic Dispatch*

Permasalahan ED merupakan permasalahan optimasi yang rumit. Pada optimisasi yang dilakukan adalah optimisasi dari segi biaya rumit. Pada optimisasi yang dilakukan adalah optimisasi dari segi biaya bahan baku pembangkitan atau *fuel cost* yang memiliki karakteristik tidak linier. Bentuk tipikal dari persamaan biaya pembangkit adalah persamaan *polynomial* orde dua direpresentasikan sebagai berikut.

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.5)$$

Keterangan :

- $F_i$  : biaya pembangkitan pada pembangkit ke- i (\$)
- $P_i$  : daya *output* dari pembangkit ke- i (MW)

*Variable* a,b,c adalah koefisien biaya operasi produksi dari suatu pembangkit. Koefisien c juga merepresentasikan biaya operasi pembangkit ketika tidak memproduksi energi listrik.



Dari persamaan 2.5 dapat diketahui bahwa hubungan antara daya yang dibangkitkan dari generator tidak linier terhadap biaya pembangkitan. Kombinasi daya *output* yang dibangkitkan oleh tiap - tiap generator pada sistem harus memenuhi kebutuhan daya dari sistem tenaga listrik (*equality constraint*) dan memenuhi batas minimum serta maksimum dari daya yang dibangkitkan generator (*inequality constraint*). Karena permasalahan sangat rumit, maka permasalahan ED hanya bisa dilakukan dengan metode iterasi. Parameter - parameter yang telah dijelaskan diatas dapat direpresentasikan dalam persamaan (2.6-2.8).

$$\text{Min } \sum F_i(P_i) = \text{Min } \sum a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.6)$$

$$P_{Gi} \min \leq P_G \leq P_{Gi} \max \quad (2.7)$$

Dengan  $P_{Gi}$  adalah besar daya yang dibangkitkan generator ke -i atau disebut dengan *inequality constraint*.

*Economic dispatch* adalah pembagian daya yang harus dibangkitkan oleh generator dalam suatu sistem tenaga listrik sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya minimum. Tujuan utama *economic dispatch* adalah meminimalkan konsumsi bahan bakar dari generator pada suatu sistem untuk memperoleh kondisi optimal. Hal ini dikenal dengan istilah optimisasi *economic dispatch*.

Penentuan daya output pada setiap generator hanya boleh bervariasi pada batas-batas (*constraint*) tertentu. *Cost function* dari i-unit generator dimodelkan dengan persamaan :

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.8)$$

$P_i$  adalah daya keluaran dari unit ke -i dan  $a_i$ ,  $b_i$ , dan  $c_i$  adalah *cost coefficient* unit generator ke- i. Masalah utama adalah memperluas *zona waktu* dari *multiple intervals* pada *dynamic economic dispatch*. Secara normal, fungsi *objective* pada permasalahan DED adalah :

$$\text{minimize } C \sum_{i=1}^T F_i(P_{it}) \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 adalah untuk meminimalkan biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit selama T-interval waktu, dengan T adalah

$T_{zone}$  dalam waktu diskrit.  $P_{it}$  adalah daya keluaran dari unit generator ke-i pada waktu-t.

Biaya diminimalkan melalui batasan :

*Real power balance,*

$$\sum_{i=1}^N P_{it} = P_{Dt} \quad (2.10)$$

$P_{Dt}$  adalah beban saat waktu-t.

*Capacity constraint,*

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max} \quad (2.11)$$

$P_{i\min}$  merupakan kapasitas pembangkitan minimum generator unit ke-i dan  $P_{i\max}$  merupakan kapasitas pembangkitan maksimum generator unit ke-i.

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## **BAB 3**

### **PENERAPAN *FIREFLY ALGORITHM* PADA KOORDINASI *HYDROTHERMAL***

Pada bab ini dijelaskan mengenai penyelesaian koordinasi *hydrothermal* jangka pendek menggunakan algoritma kunang-kunang atau *firefly algorithm*. Pengolahan data dan simulasi dikerjakan dengan menggunakan *software Matlab*.

#### **3.1 Koordinasi *Hydrothermal***

Sistem *hydrothermal* terdiri dari subsistem unit *hydro* dan subsistem unit *thermal*. Koordinasi diantara keduanya bertujuan untuk meminimalkan biaya pembangkitan *thermal* dengan memaksimalkan pembangkitan *hydro* agar diperoleh koordinasi *hydrothermal* yang optimal. Koordinasi ini dilakukan dalam periode waktu 24 jam dengan memenuhi semua *constraints* yang disepakati, antara lain :

1. Batasan dan biaya operasi pembangkitan *thermal*.
2. Batasan dan karakteristik pembangkitan *hydro*.
3. *Power balance constraint*.
4. *Dynamic water balance constraint*.
5. Inisialisasi *volume* awal dan *volume* akhir *reservoir hydro*.
6. Batasan *volume* maksimum dan minimum *reservoir hydro*.
7. Batasan *water discharge* maksimum dan minimum *hydro*.

Dalam hal ini, permasalahan koordinasi *hydrothermal* adalah *economic load dispatch* pada pembangkit *thermal* sekaligus memenuhi semua batasan - batasan baik pembangkit unit *hydro* maupun pembangkit unit *thermal* yang telah disepakati.

#### **3.2 *Objective Function* dan *Constraints***

Pada koordinasi *hydrothermal* jangka pendek *objective function* dan *constraints* yang dipergunakan dirumuskan dalam beberapa persamaan, seperti :

##### **3.2.1 *Economic Scheduling***

Tujuan utama dari koordinasi *hydrothermal* adalah untuk meminimalkan total *fuel cost* pembangkit unit *thermal*. *Objective function* dari total *fuel cost* pembangkit unit *thermal* dapat dirumuskan dalam persamaan (3.1).[5]

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NS} f_i(P_{si,t}) \quad (3.1)$$

Penjabaran perumusan dari *fuel cost* pembangkit unit *thermal* sendiri dinyatakan pada persamaan (3.2). [5]

$$f_i(P_{si,t}) = a_i + b_i P_{si,t} + c_i P_{si,t}^2 \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (3.2)$$

$F$  : total *fuel cost* unit *thermal* sepanjang periode.  
 $f_i(P_{si,t})$  : *fuel cost* unit *thermal* (i) pada waktu (t).  
 $P_{si,t}$  : pembangkitan unit *thermal* (i) pada waktu (t).  
 $a_i, b_i, c_i$  : koefisien *fuel cost* unit *thermal* (i).  
 $T$  : total periode koordinasi.

### 3.2.2 Constraints

Disamping minimalkan total *fuel cost* pembangkit unit *thermal*, dalam pengkoordinasian *hydrothermal* harus memenuhi semua batasan-batasan yang disepakati.

#### 3.2.2.1 Power Balance Ccnstraint

Total daya aktif yang dibangkitkan oleh pembangkit unit *hydro* dan unit *thermal* harus cukup memenuhi *forecasted demand* yang dirumuskan dalam persamaan (3.3). [5]

$$\sum_{i=1}^{NS} f_i(P_{si,t}) + \sum_{j=1}^{NS} P_{hj,t} = P_{D,t} \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad j = 1, 2, \dots, N_h \quad (3.3)$$

$f_i(P_{si,t})$  : *fuel cost* unit *thermal* (i) pada waktu (t).  
 $P_{hj,t}$  : pembangkitan unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $P_{D,t}$  : daya aktif pembebanan pada waktu (t).

#### 3.2.2.2 Pembangkitan unit Hydro

Karakteristik dari pembangkitan unit *hydro* dapat dirumuskan pada persamaan (3.4). [5]

$$Q_{hj,t} = a_j + b_j P_{hj,t} \quad j = 1, 2, \dots, N_h \quad (3.4)$$

- $Q_{hj,t}$  : water discharges dari *reservoir* (j) pada waktu (t).  
 $P_{hj,t}$  : pembangkitan unit *hydro* (i) pada waktu (t).  
 $a_j, b_j$  : koefisien pembangkitan unit *hydro* (j) .

### 3.2.2.3 Inisialisasi Volume Awal dan Volume Akhir Reservoir

Dalam koordinasi *hydrothermal* ini ditentukan *volume reservoir* awal dan *volume reservoir* akhir yang diinginkan. Sehingga dalam periode koordinasi *hydrothermal* selanjutnya masih terdapat air yang bisa digunakan dalam *reservoir*. Dinyatakan dalam persamaan (3.5).[5]

$$\begin{aligned}
 V_{hj,1} &= V_{hj}^{awal} \\
 V_{hj,T+1} &= V_{hj}^{akhir} \\
 j &= 1, 2, \dots, N_h
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

- $V_{hj,t}$  : *volume reservoir* (j) pada waktu (t).  
 $V_{hj}^{awal}$  : initial awal *volume reservoir* (j).  
 $V_{hj}^{akhir}$  : *volume akhir reservoir* (j).

### 3.2.2.4 Power Generation Limit pada Generator

Batasan pembangkitan maksimum dan minimum pada unit *hydro* maupun unit *thermal* dapat dirumuskan melalui persamaan (3.6).[5]

$$\begin{aligned}
 P_{si}^{min} &\leq P_{si,t} \leq P_{si}^{max} \\
 P_{hj}^{min} &\leq P_{hj,t} \leq P_{hj}^{max} \\
 i &= 1, 2, \dots, N_s \\
 j &= 1, 2, \dots, N_h
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

- $P_{si,t}$  : pembangkitan unit *thermal* (i) pada waktu (t).  
 $P_{si}^{min}$  : batas minimum pembangkitan unit *thermal* (i).  
 $P_{si}^{max}$  : batas maksimum pembangkitan unit *thermal* (i).  
 $P_{hj,t}$  : pembangkitan unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $P_{hj}^{min}$  : batas minimum pembangkitan unit *hydro* (j).  
 $P_{hj}^{max}$  : batas maksimum pembangkitan unit *hydro* (j).

### 3.2.2.5 Batasan Volume Maksimum dan Minimum Reservoir

Batasan *volume reservoir* bertujuan untuk memastikan ketersediaan air dan menjaga ketinggian air dalam *reservoir* yang dirumuskan melalui persamaan (3.7). [5]

$$V_{hj}^{min} \leq V_{hj,t} \leq V_{hj}^{max} \quad j = 1, 2, \dots, N_h \quad (3.7)$$

$V_{hj,t}$  : *volume reservoir* unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $V_{hj}^{min}$  : batas minimum *volume reservoir* unit *hydro* (j).  
 $V_{hj}^{max}$  : batas maksimum *volume reservoir* unit *hydro* (j).

### 3.2.2.6 Batasan Water Discharge Maksimum dan Minimum

Batasan laju *water discharge* disini dalam interval waktu per jam, yang dirumuskan dalam persamaan (3.8).[5]

$$Q_{hj}^{min} \leq Q_{hj,t} \leq Q_{hj}^{max} \quad j = 1, 2, \dots, N_h \quad (3.8)$$

$Q_{hj,t}$  : *water discharges* unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $Q_{hj}^{min}$  : batas minimum *water discharges* unit *hydro* (j).  
 $Q_{hj}^{max}$  : batas maksimum *water discharges* unit *hydro* (j).

### 3.2.2.7 Dynamic Water Balance pada Reservoir

Keseimbangan ketersediaan *volume* air antara air yang masuk dan air yang keluar dalam *reservoir* dirumuskan dalam persamaan (3.9).[5]

$$V_{hj,t+1} = V_{hj,t} + I_{hj,t} - Q_{hj,t} \quad \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, N_h \\ t = 1, 2, \dots, T \end{matrix} \quad (3.9)$$

$V_{hj,t}$  : *volume reservoir* (j) pada waktu (t).  
 $I_{hj,t}$  : *water in flow* unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $Q_{hj,t}$  : *water discharges* unit *hydro* (j) pada waktu (t).

## 3.3 Firefly Algorithm

Bukan hal baru untuk mengatakan optimisasi telah tersebar luas, mulai dari desain rekayasa untuk perencanaan bisnis hingga *routing Internet* untuk perencanaan liburan. Pada hampir semua kegiatan ini, berusaha untuk mencapai tujuan tertentu atau untuk mengoptimalkan sesuatu seperti keuntungan, kualitas, dan waktu. Simulasi komputer menjadi alat yang sangat diperlukan untuk memecahkan masalah optimisasi tersebut dengan berbagai algoritma pencarian yang efisien.

Bahkan saat ini banyak dikembangkan algoritma yang mengadopsi dan mengadaptasi dari perilaku-perilaku alam.

Kedip cahaya kunang-kunang merupakan pemandangan yang menakjubkan di langit musim panas di daerah tropis dan subtropis. Ada sekitar dua ribu spesies kunang-kunang, dan sebagian besar kunang-kunang menghasilkan kedip cahaya yang pendek dan berirama. Kedip cahaya ini dihasilkan oleh proses *bioluminescence*, namun fungsi yang sebenarnya dari sistem sinyal kedip tersebut masih diperdebatkan. Dua fungsi dasar kedip cahaya tersebut adalah untuk menarik lawan jenis (komunikasi), dan untuk menarik mangsa. Pola kedip, tingkat cahaya, dan lama waktu kedip mempengaruhi sinyal yang dipancarkan.

Intensitas cahaya pada jarak tertentu dari sumber cahaya mematuhi hukum kuadrat terbalik. Berarti, intensitas cahaya mengecil dengan peningkatan jarak  $r$ . Selain itu, udara menyerap cahaya sehingga menjadi lemah dan lebih lemah sejalan dengan bertambah jarak. Kedua faktor gabungan ini membuat sebagian besar visual kunang - kunang memiliki jarak batas. Cahaya kedip kunang-kunang dapat dirumuskan sedemikian rupa sehingga terbentuk fungsi objektif yang dioptimisasi.

Untuk menyederhanakan algoritma kunang - kunang yang dikembangkan oleh Xin-She Yang di Universitas Cambridge pada 2007, dapat digunakan tiga peraturan sebagai berikut : [6]

1. Semua kunang - kunang berjenis kelamin satu, sehingga seekor kunang - kunang akan tertarik pada kunang - kunang lain terlepas dari jenis kelaminnya.
2. Daya tarik sebanding dengan tingkat kecerahan cahaya kedip kunang - kunang. Oleh karena itu, untuk setiap dua kunang-kunang berkedip, satu dia antara mereka akan bergerak ke yang lain yang lebih terang. Kecerahan mereka menurun karena jarak antara kunang - kunang meningkat. Jika tidak ada yang paling terang dari populasi tersebut, semua kunang - kunang akan bergerak secara acak.
3. Kecerahan dari seekor kunang - kunang dipengaruhi atau mewakili suatu fungsi objektif.

Dalam proses optimisasi, kecerahan cahaya kunang - kunang adalah sebanding dengan nilai dari fungsi tujuan. Bentuk lain dari kecerahan dapat didefinisikan pada cara yang sama untuk fungsi fitness pada algoritma genetik. Berdasarkan pada ketiga peraturan ini, langkah



dasar dari algoritma kunang-kunang (FA) dapat diringkas sebagai *pseudo code* berikut :[6]

```

Fungsi objektif  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ .
Inisialisasi populasi kunang - kunang  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) .
Intensitas cahaya  $I_i$  pada  $X_i$  ditentukan oleh  $f(x_i)$ .
Tentukan koefisien penyerapan cahaya  $\gamma$ .
while ( $t < \text{Max Generation}$ )
  for  $i = 1 : n$  (semua  $n$  kunang-kunang ).
    for  $j = 1 : n$  (semua  $n$  kunang-kunang).
      if ( $I_j > I_i$ ) (pindahkan firefly  $i$  menuju  $j$  pada dimensi  $d$ ).
      Ketertarikan populasi dengan jarak  $r$  pada  $\exp[-\gamma r]$ .
      Evaluasi solusi baru dan perbarui intensitas cahaya.
    end for  $j$ 
  end for  $i$ 
  Urutkan peringkat kunang-kunang dan cari posisi terbaik baru.
end while
Tampilkan hasil.

```

### 3.3.1 Intensitas Cahaya dan Daya Tarik

Pada algoritma kunang-kunang, ada dua hal penting yang perlu diperhatikan, yaitu variasi intensitas cahaya dan formulasi dari daya tarik. Secara sederhana, dapat diasumsikan bahwa daya tarik dari seekor kunang-kunang ditentukan oleh intensitas kecerahan yang bergantung pada formulasi fungsi tujuan.

Pada kasus yang sederhana untuk masalah optimisasi maksimum, kecerahan  $I$  dari seekor kunang-kunang pada sebuah lokasi  $x$  tertentu dapat diformulasikan sebagai  $I(x) \propto f(x)$ . Adapun daya tarik  $\beta$  adalah relatif, itu dapat diperoleh dari penglihatan kunang-kunang lain. Daya tarik akan bervariasi dengan jarak  $r_{ij}$  antara kunang-kunang  $i$  dengan kunang-kunang  $j$ . Selain itu, intensitas cahaya akan menurun seiring peningkatan jarak kunang-kunang dari sumber cahaya, dan cahaya juga diserap oleh lingkungan sekitar. Jadi kita dapat memvariasikan daya tarik terhadap derajat dari penyerapan  $\gamma$ . Parameter  $\gamma$  mencirikan variasi dari daya tarik, dan nilai  $\gamma$  sangat penting pada penentuan kecepatan konvergensi dan bagaimana perilaku algoritma FA.

Istilah ketiga adalah pengacakan dengan  $\alpha$  sebagai parameter pengacakan, dan  $\epsilon_i$  adalah sebuah vektor dari nilai-nilai acak yang diambil dari distribusi Gaussian atau distribusi seragam. Sebagai contoh,

bentuk paling sederhana dari  $\varepsilon_i$  dapat dihasilkan dari random yang merupakan generator angka acak yang merata antara nilai 0 hingga 1.

### 3.4 Koordinasi *Hydrothermal* menggunakan FA

Algoritma kunang - kunang atau *firefly algorithm* (FA) merupakan metode yang digunakan pada program untuk menyelesaikan koordinasi *hydrothermal* jangka pendek. FA akan menentukan kombinasi pembangkitan unit pembangkit *hydro* dan unit pembangkit *thermal* selama periode 24 jam dalam selang waktu satu jam untuk memenuhi pembebanan yang telah ditentukan.

**Tabel 3.1** Persamaan Parameter *Firefly Algorithm* dengan Koordinasi *Hydrothermal*.

Parameter	
<i>Firefly Algorithm</i>	Koordinasi <i>Hydrothermal</i>
<i>Firefly (hydro)</i>	Debit air yang keluar dari <i>reservoir</i> atau <i>water discharge</i> (Q).
<i>Firefly (thermal)</i>	Daya yang dibangkitkan (P) pada setiap unit <i>thermal</i> dalam satu interval waktu.
Populasi <i>firefly (hydro)</i>	Sekelompok calon solusi untuk debit air yang keluar atau <i>water discharge</i> (Q).
Populasi <i>firefly (thermal)</i>	Sekelompok calon solusi untuk daya yang dibangkitkan (P) unit <i>thermal</i> dalam satu interval waktu.
Jarak antara dua ekor <i>firefly (hydro)</i>	Perbedaan nilai debit air yang keluar atau <i>water discharge</i> diantara dua buah calon solusi.
Jarak antara dua ekor <i>firefly (thermal)</i>	Perbedaan nilai daya yang dibangkitkan diantara dua buah calon solusi.
Intensitas cahaya <i>firefly</i>	Total biaya pembangkitan unit <i>thermal</i> .
<i>Firefly</i> paling terang	Solusi dengan biaya pembangkitan paling minimum.

#### 3.4.1 Inisialisasi Awal FA

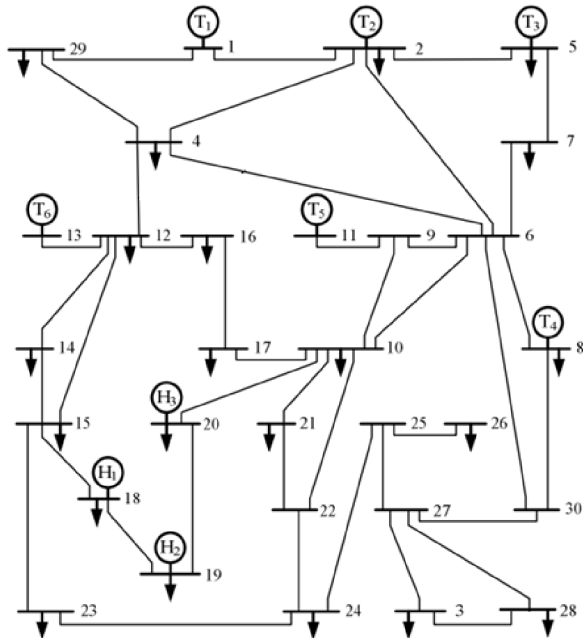
Pada proses inisialisasi, pertama yang dilakukan adalah memuat sistem yang akan dikoordinasi. Pada Tugas Akhir ini menggunakan sistem uji IEEE 30 *bus*. Data yang digunakan berasal dari *referensi paper* IEEE.

##### 3.4.1.1 Sistem Uji IEEE 30 Bus

Pada sistem uji IEEE 30 *bus* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini, terdapat enam unit pembangkit *thermal* dan tiga unit pembangkit *hydro*. *Single line diagram* digambarkan pada gambar 3.1 dan data-data yang digunakan dalam proses simulasi dinyatakan pada tabel (3.1-3.3).

**Tabel 3.2** Unit Karakteristik Pembangkit *Hydro*. [7]

Parameter	$a(P_H)$	$b$
Unit H1	0,191	-3,612
Unit H2	0,150	-3,256
Unit H3	0,118	-14,51



**Gambar 3.1** Single Line Diagram Sistem Uji IEEE 30 Bus. [7]

**Tabel 3.3** Data Pembangkitan Unit *Thermal*. [7]

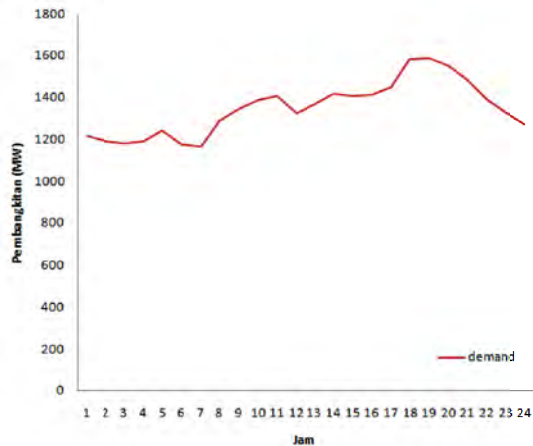
Parameter	Unit T1	Unit T2	Unit T3	Unit T4	Unit T5	Unit T6
$P_{max}$ (MW)	470	460	130	120	80	55
$P_{min}$ (MW)	150	135	20	47	20	55
$a$ (\$/MW <sup>2</sup> h)	0,00043	0,00063	0,00211	0,00480	0,10908	0,00951
$b$ (\$/MWh)	21,60	21,05	16,51	23,23	19,58	22,54
$c$ (\$/h)	958,20	1313,6	502,70	639,40	455,60	692,40

**Tabel 3.4** Data Pembangkit Unit *Hydro*. [7]

Parameter	V <sub>min</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>ini</sub>	V <sub>fin</sub>	Q <sub>min</sub>	Q <sub>max</sub>	I	P <sub>min</sub>	P <sub>max</sub>
	* 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>							MW	
Unit H1	60	120	80	70	0	34,588	10	0	200
Unit H2	80	150	100	120	0	34,244	10	0	250
Unit H3	70	160	120	140	0	20,890	10	0	300

ket :

- V : volume
- Q : water discharge
- I : water in flow



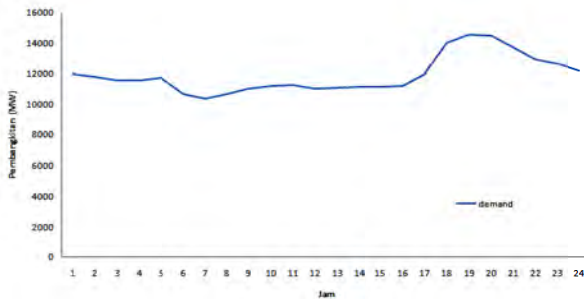
**Gambar 3.2** Kurva Profil Pembebanan Kasus 1 selama 24 Jam.

**Tabel 3.5** Total Pembebanan Kasus 1 tiap Jam selama 24 Jam.

Forecasted Demand selama 24 Jam					
Jam	MW	Jam	MW	Jam	MW
1	1215,58	9	1343,85	17	1446,50
2	1193,70	10	1387,22	18	1581,26
3	1181,13	11	1409,13	19	1588,65
4	1190,33	12	1325,83	20	1550,58
5	1240,20	13	1368,90	21	1484,28
6	1177,9	14	1415,70	22	1390,55
7	1165,55	15	1406,74	23	1327,86
8	1287,00	16	1412,80	24	1275,43

**Tabel 3.6** Total Pembebanan Kasus 2 tiap Jam selama 24 Jam.

<i>Forecasted Demand selama 24 Jam</i>					
Jam	MW	Jam	MW	Jam	MW
1	1199,90	9	1099,85	17	1199,35
2	1177,32	10	1119,13	18	1399,70
3	1154,63	11	1122,76	19	1454,85
4	1158,05	12	1101,08	20	1451,42
5	1170,82	13	1106,67	21	1370,70
6	1064,40	14	1112,94	22	1293,65
7	1034,93	15	1112,50	23	1267,30
8	1067,74	16	1119,23	24	1216,00



**Gambar 3.3** Kurva Profil Pembebanan Kasus 2 selama 24 Jam.

### 3.4.1.2 Pembangkitan Kandidat Calon Solusi

Inisialisasi populasi yang dibangkitkan merepresentasikan calon solusi untuk *water discharges* unit *hydro* dan pembangkitan unit *thermal*. Nilai ini dibangkitkan secara acak tetapi berada diantara batasan-batasan yang disepakati, berdasarkan persamaan (3.6) dan (3.8).

### 3.4.2 Operasi Pembangkitan *Hydro*

*Water discharge* yang dikeluarkan setiap unit digunakan untuk menghitung daya aktif yang dihasilkan di setiap unit pembangkit *hydro* berdasarkan persamaan (3.4). *Volume reservoir* pada waktu itu juga dihitung berdasarkan persamaan (3.9). Hal ini digunakan untuk memeriksa batasan *volume reservoir* berdasarkan persamaan (3.7), batasan *water discharge* berdasarkan persamaan (3.8), dan batasan daya yang dibangkitkan berdasarkan persamaan (3.4) dipenuhi.

### 3.4.3 Load Balance

Perhitungan *load balance* digunakan untuk menentukan berapa daya yang harus dibangkitkan oleh pembangkit unit *thermal* berdasarkan persamaan (3.3).

### 3.4.4 Operasi Pembangkitan Thermal

Perhitungan ini digunakan untuk menghasilkan nilai berdasarkan persamaan (3.2) yang nantinya akan dibandingkan dengan kandidat solusi yang lain guna mendapatkan pembangkitan unit *thermal* yang optimal.

### 3.4.5 Evaluasi Fitness Function

Evaluasi *fitness function* digunakan untuk mengukur kelayakan dari calon solusi berdasarkan operasi pembangkit *thermal* dan batasan-batasan yang harus dipenuhi. Fungsi *fitness* ini dapat dirumuskan dalam persamaan (3.10).

$$\begin{aligned} fitness(X_i^k) &= F(X_i^k) + error(X_i^k) * pu\_nik(k) \\ i &= 1, 2, \dots, N \\ k &= 1, 2, \dots, k_{max} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$fitness(X_i^k)$  : kelayakan calon solusi (i) pada iterasi (k).  
 $F(X_i^k)$  : total *fuel cost* calon solusi (i) pada iterasi (k).  
 $error(X_i^k)$  : strategi untuk *reservoir* constraint calon solusi (i) pada iterasi (k).  
 $pu\_nik(k)$  : faktor pengali ketika constraint dilanggar pada iterasi (k).

*Error* disini adalah strategi yang digunakan untuk mendapatkan *volume* akhir *reservoir* yang diinginkan berdasarkan *volume* awal, *water discharge*, dan *water inflow* pada *reservoir*. Persamaan tersebut dirumuskan dalam persamaan (3.11).[5]

$$error_j = V_{hj,awal} - V_{hj,akhir} - \sum_{t=1}^T Q_{hj,t} + \sum_{t=1}^T I_{hj,t} \quad (3.11)$$

$error_j$  : startegi untuk memenuhi *reservoir* constraint.  
 $V_{hj,awal}$  : *volume* awal *reservoir* unit *hydro* (j).  
 $V_{hj,akhir}$  : *volume* akhir *reservoir* unit *hydro* (j).  
 $Q_{hj,t}$  : *water discharges* unit *hydro* (j) pada waktu (t).  
 $I_{hj,t}$  : *water in flow* unit *hydro* (j) pada waktu (t).

Untuk mempermudah melakukan pengukuran kelayakan calon solusi maka calon solusi yang berada di luar *constraints* diberi faktor pengali sehingga kelayakan mereka semakin buruk. Faktor pengali ini dibuat sedemikian rupa sehingga semakin banyak proses iterasi maka faktor pengalinya semakin besar agar hasil yang optimal cepat diperoleh. Strategi untuk faktor pengali dirumuskan dalam persamaan (3.12).[5]

$$pu\ ni(k) = a + \frac{k}{k_{max}} * b \quad k = 1, 2, \dots, k_{max} \quad (3.12)$$

*pu ni(k)* : faktor pengali ketika *constraint* dilanggar pada iterasi (k).  
*a* : faktor pengali minimum.(ex.10)  
*k* : iterasi ke-  
*k<sub>max</sub>* : iterasi maksimum.  
*b* : faktor pengali maksimum.(ex.1000)

### 3.4.6 Operasi *Firefly*

Setelah memperoleh nilai *fitness*, untuk mengukur kelayakan calon solusi dilakukan perangkingan posisi kunang-kunang. Nilai *fitness* yang paling kecil melambangkan kunang - kunang yang memiliki kedip cahaya paling terang. Kunang - kunang yang mempunyai kedip cahaya paling terang melambangkan kandidat solusi yang memiliki biaya total pembangkitan yang paling ekonomis. Sesuai dengan aturan dari *Firefly Algorithm* yang dikembangkan oleh Xin She Yang, maka kunang - kunang yang mempunyai kedip cahaya paling terang akan menarik kunang - kunang lain. Kemudian semua kunang - kunang akan bergerak menuju kunang - kunang yang mempunyai kedip cahaya paling terang. Secara sederhana, intensitas cahaya kunang - kunang dirumuskan pada persamaan (3.13).[6]

$$I_{(r)} = I_s / r^2 \quad (3.13)$$

*I<sub>s</sub>* adalah intensitas pada sumber, yaitu intensitas cahaya kunang - kunang yang paling terang. Untuk mencegah *Firefly Algorithm* terjebak dalam nilai optimum lokal maka intensitas cahaya dipengaruhi pula oleh koefisien *light absorption* ( $\gamma$ ) sehingga intensitas cahaya dirumuskan seperti persamaan (3.14). [6]

$$I_{(r)} = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.14)$$

$I_0$  adalah intensitas cahaya original, yaitu intensitas cahaya tiap kunang-kunang. Kemudian untuk menghindari *singularity* ketika  $r=0$  maka dapat dirumuskan melalui persamaan (3.15).[6]

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.15)$$

Pada saat kunang - kunang berdekatan maka akan timbul daya tarik menarik yang dilambangkan dengan  $\beta$  yang dirumuskan dalam persamaan (3.16).[6]

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.16)$$

$\beta_0$  adalah daya tarik pada  $r=0$ , daya tarik ini akan memicu kunang-kunang untuk bergerak mendekat menuju kunang-kunang yang memiliki daya tarik terkuat. Untuk mengetahui jarak antara dua kunang - kunang dapat dirumuskan dalam persamaan (3.17).[6]

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.17)$$

Sedangkan pergerakan sebuah kunang - kunang (i) yang tertarik dengan kunang - kunang lain yang lebih terang dirumuskan dalam persamaan (3.18). [6]

$$x_i = x_i + \beta_0 * \exp(-\gamma r_{ij}^2) * (x_j - x_i) + \alpha * (rand - 1/2) \quad (3.18)$$

$\alpha$  adalah parameter pengacakan dan *rand* merupakan nilai - nilai acak yang dibangkitkan dan didistribusikan seragam antara 0 sampai 1.

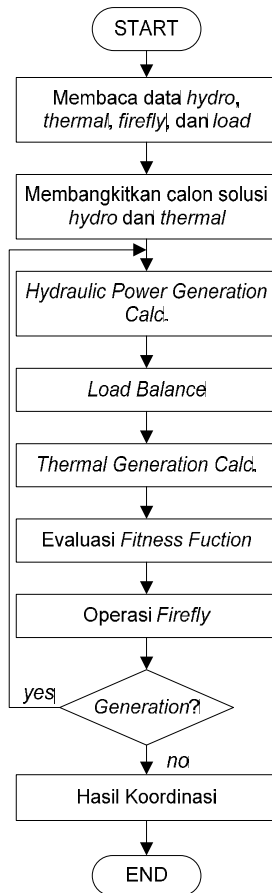
### 3.4.7 Hasil Koordinasi

Pada bagian akhir, setelah mencapai iterasi maksimum akan ditampilkan hasil koordinasi *hydrothermal* satu periode dalam *interval* satu jam yang berupa pembangkitan unit *hydro*, *water discharge*, *volume reservoir*, pembangkitan unit *thermal*, dan total *fuel cost*. Selain itu, ditampilkan pula grafik konvergensi *firefly algorithm*, grafik pembebanan, grafik *water discharge*, dan grafik *volume reservoir*.

### 3.4.8 Flowchart Koordinasi Hydrothermal menggunakan FA

*Flowchart* penerapan *firefly algorithm* untuk menyelesaikan koordinasi jangka pendek pembangkitan *hydrothermal* dapat dilihat pada gambar 3.4.





**Gambar 3.4** Flowchart Koordinasi Hydrothermal menggunakan FA.

## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas tentang simulasi yang dihasilkan oleh program *Firefly algorithm* (FA) untuk menyelesaikan koordinasi jangka pendek pembangkitan *hydrothermal* dengan mengoptimalkan pembangkit unit *hydro* dan meminimalkan pembangkit unit *thermal*. Hasil perhitungan biaya pembangkitan total merupakan biaya yang paling ekonomis.

#### 4.1 Parameter *Firefly Algorithm*

Parameter - parameter yang digunakan pada FA, meliputi : jumlah kunang - kunang, jumlah iterasi maksimal, koefisien pengacakan  $\alpha$ , koefisien daya tarik awal  $\beta_0$ , dan koefisien penyerapan cahaya  $\gamma$ . Besar parameter - parameter tersebut dimuat dalam Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Settingan Parameter *Firefly algorithm* yang digunakan.

No.	Parameter	Nilai
1	Jumlah Kunang - Kunang	40
2	Jumlah Iterasi Maksimal	1000
3	Alpha ( $\alpha$ )	0,78
4	Betamin ( $\beta_0$ )	0,5
5	Gamma ( $\gamma$ )	0,1

Parameter - parameter pada Tabel 4.1 digunakan secara konsisten dalam keseluruhan simulasi koordinasi *hydrothermal* menggunakan FA. Jumlah kunang - kunang menyatakan jumlah calon solusi. Jumlah iterasi merupakan jumlah total evaluasi fungsi secara keseluruhan. Alpha merupakan konstanta yang menyatakan pengacakan masing - masing kunang - kunang. Betamin merupakan konstanta yang diperlukan FA untuk update pergerakan dan gamma merupakan konstanta penyerapan cahaya yang mempengaruhi intensitas cahaya tiap kunang - kunang.

#### 4.2 Performa Komputasi

Pada program simulasi Tugas Akhir ini menggunakan komputer dengan spesifikasi yang tercantum pada Tabel 4.2.

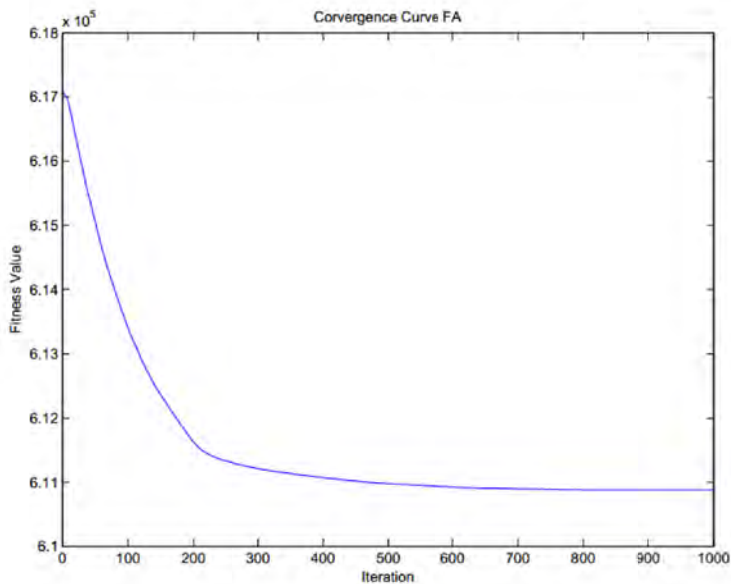
**Tabel 4.2** Data Spesifikasi komputasi yang digunakan.

No.	Parameter	Spesifikasi
1	<i>Processor</i>	Intel (R) Core(TM) i5-2410M
2	<i>Speed Processing</i>	2,30 Ghz
3	<i>Installed Memory (RAM)</i>	8,00 GB
4	<i>System Type</i>	64-bit <i>Operating System</i>
5	<i>Software Simulasi</i>	Matlab R2010a

### 4.3 Hasil Simulasi

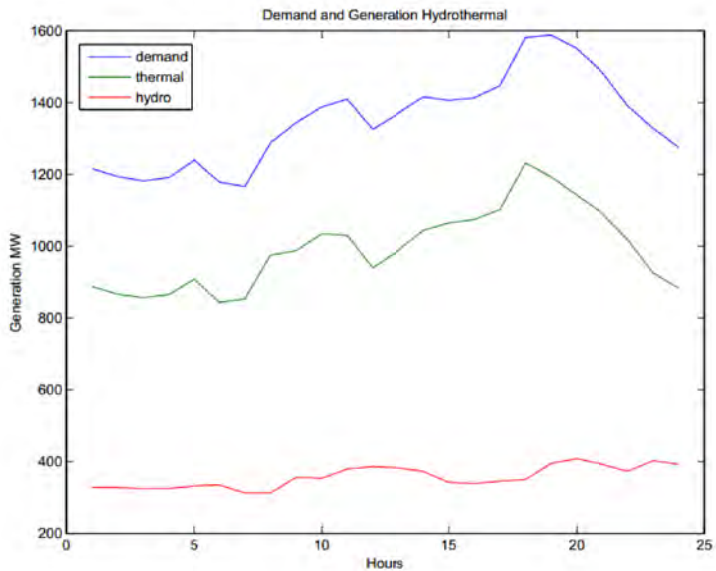
Pada Tugas Akhir ini dilakukan simulasi koordinasi *hydrothermal* menggunakan *firefly algorithm*, yang mendapatkan hasil sebagai berikut.

#### 4.3.1 Hasil Simulasi Kasus 1



**Gambar 4.1** Kurva Korvengensi Koordinasi *Hydrothermal* FA pada Kasus 1.

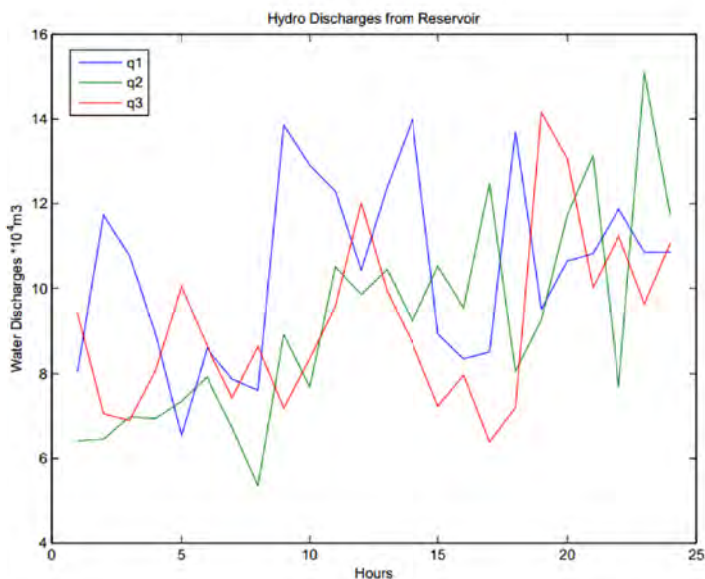
Dapat dilihat pada Gambar 4.1, ketika iterasi diantara 700 dan 800 grafik sudah lurus tidak mengalami pergeseran nilai sampai iterasi 1000. Hal ini menggambarkan bahwa mulai iterasi diantara 700 dan 800 *fitness value* sudah mencapai titik konvergensi dari koordinasi *hydrothermal*. Titik konvergensi ini menggambarkan bahwa hasil yang optimum sudah dicapai.



**Gambar 4.2** Kurva Pembebanan dan Pembangkitan *Hydrothermal* selama 24Jam pada Kasus 1.

Pada Gambar 4.2 menggambarkan kurva pembebanan pada kasus 1 dan hasil pembangkitan *hydrothermal* selama 24 jam. Kasus 1 ini menggambarkan profil beban pada saat *weekday*. Garis biru merupakan kurva pembebanan. Dapat dilihat pada jam 5.00 beban naik untuk beberapa saat karena orang-orang sudah mulai bangun dan kemudian beban turun kembali karena matahari sudah terbit, penerangan - penerangan mulai dimatikan. Pada jam 7.00 beban mulai beranjak naik, karena orang-orang mulai beraktivitas, perkantoran buka, mesin-mesin

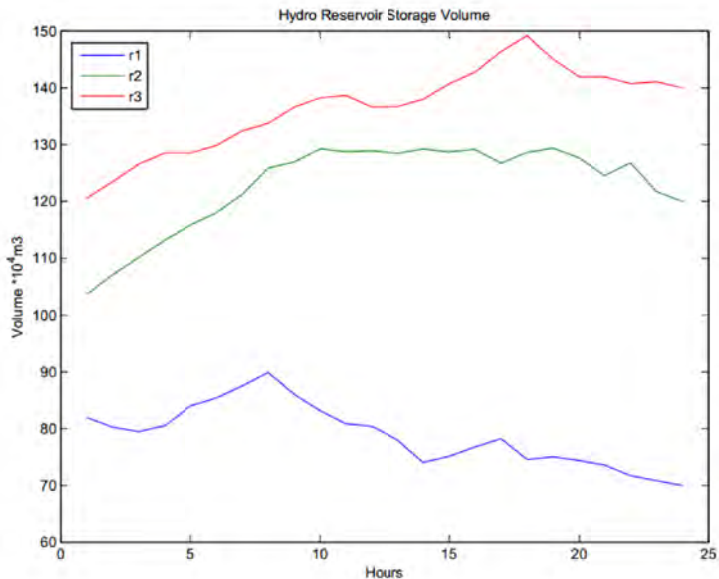
pabrik mulai beroperasi. Di siang hari antara jam 12.00 dan 13.00 beban sedikit turun, karena di saat itu banyak kegiatan yang diistirahatkan. Di sore hari mulai kira - kira jam 17.00 beban naik drastis dalam dua jam, karena orang-orang mulai menghidupkan tv untuk hiburan, lampu untuk penerangan puncaknya pada jam 19.00. Kemudian mulai jam 21.00 orang-orang mulai banyak mengurangi aktivitasnya, mematikan tv, mematikan lampu dan tidur. Untuk memikul beban-beban tersebut selama 24 jam unit *hydro* yang di grafik warna merah dibangkitkan untuk memikul beban dasar. Sisanya untuk memenuhi beban tersebut unit *thermal* dibangkitkan agar pembangkitan total mampu memikul keseluruhan beban.



**Gambar 4.3** Kurva *Water discharges* Unit *Hydro* selama 24Jam pada Kasus 1.

Dapat dilihat Gambar 4.3 merupakan kurva air yang keluar dari *reservoir* melalui *penstock* menuju turbin untuk memutar generator. Jumlah air yang keluar ini ekuivalen dengan daya aktif yang dibangkitkan generator.

Untuk melihat keseimbangan *reservoir* kita perlu membandingkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Dimana Gambar 4.4 merupakan kurva perubahan *volume reservoir* selama 24 jam. Untuk unit *hydro* 1 di gambarkan kurva warna biru, dapat dilihat pada jam 10 air yang keluar pada Gambar 4.3 melonjak tajam, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.4 berangsur-angsur turun. Demikian pula pada unit *hydro* 2 di gambarkan kurva warna hijau, dapat dilihat pada jam 8 air yang keluar pada Gambar 4.3 sedikit, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.4 berangsur-angsur naik, karena air yang dikeluarkan sedikit namun debit air yang masuk tetap sama. Hal yang sama pula terjadi pada unit *hydro* 3 digambarkan kurva warna merah, dapat dilihat pada jam 17 air yang keluar pada Gambar 4.3 sedikit, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.4 naik, karena air yang dikeluarkan sedikit namun debit air yang masuk tetap sama.



**Gambar 4.4** Kurva *Volume Reservoir* Unit *Hydro* selama 24 Jam pada Kasus 1.

Perhatikan Gambar 4.4 untuk grafik unit *hydro* 1 warna biru, nilai akhirnya turun terhadap nilai awal. Sedangkan pada grafik unit *hydro* 2 warna hijau dan 3 warna merah, nilai akhirnya naik terhadap nilai awal. Hal ini dikarenakan *volume* akhir yang ditentukan pada unit 2 dan 3 memang lebih tinggi dari pada *volume* awal yang ditentukan. Sedangkan pada unit 1 *volume* akhir yang ditentukan lebih kecil dari *volume* awal. Hal tersebut menggambarkan koordinasi pada jam terakhir mampu mencapai *volume* akhir yang ditentukan.

**Tabel 4.3** Hasil *Water discharge* Reservoir setiap Jam.

<i>Water discharge of Reservoir</i>			
Jam	Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
1	8,00	6,38	9,39
2	11,75	6,50	7,09
3	10,77	6,99	6,90
4	8,94	6,95	8,08
5	6,58	7,37	10,05
6	8,59	7,91	8,65
7	7,92	6,77	7,46
8	7,67	5,41	8,67
9	13,88	8,96	7,22
10	12,91	7,71	8,37
11	12,25	10,48	9,57
12	10,42	9,83	11,99
13	12,34	10,42	9,93
14	14,02	9,27	8,75
15	8,98	10,53	7,26
16	8,36	9,55	7,97
17	8,55	12,46	6,42
18	13,72	8,10	7,23
19	9,50	9,25	14,12
20	10,60	11,68	13,02
21	10,77	13,07	9,99
22	11,92	7,76	11,25
23	10,78	14,99	9,60
24	10,79	11,65	11,02

**Tabel 4.4** Hasil *Volume Storage* Reservoir setiap Jam.

<i>Volume Storage of Reservoir</i>			
Jam	Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
1	82,00	103,62	120,61
2	80,25	107,13	123,52
3	79,48	110,13	126,62
4	80,54	113,18	128,54
5	83,96	115,81	128,49
6	85,37	117,90	129,84
7	87,45	121,13	132,38
8	89,78	125,72	133,70
9	85,90	126,76	136,48
10	82,99	129,05	138,11
11	80,73	128,57	138,54
12	80,32	128,73	136,55
13	77,98	128,32	136,62
14	73,96	129,05	137,87
15	74,98	128,52	140,61
16	76,61	128,97	142,64
17	78,07	126,51	146,22
18	74,35	128,41	148,99
19	74,85	129,16	144,88
20	74,25	127,48	141,86
21	73,48	124,41	141,87
22	71,56	126,65	140,62
23	70,79	121,65	141,02
24	70,00	120,00	140,00

Dari hasil simulasi diperoleh *water discharge* tiap unit untuk setiap jam pada Tabel 4.3 yang nilainya *equivalen* dengan daya yang

dibangkitkan. Kemudian Tabel 4.4 menggambarkan perubahan *volume* dan ketersediaan air dalam *reservoir* pada setiap jam.

**Tabel 4.5** Hasil Pembangkitan Unit *Hydro* selama 24 Jam pada Kasus 1.

Jam	Total Pembangkitan <i>Hydro</i>			
	Unit (MW)			
	1	2	3	PH
1	60,78	64,21	202,52	327,51
2	80,45	65,02	183,07	328,54
3	75,28	68,34	181,45	325,07
4	65,74	68,03	191,47	325,24
5	53,36	70,86	208,12	332,34
6	63,90	74,43	196,26	334,59
7	60,39	66,83	186,20	313,42
8	59,05	57,77	196,46	313,28
9	91,58	81,47	184,17	357,22
10	86,53	73,13	193,90	353,56
11	83,07	91,57	204,08	378,72
12	73,44	87,26	224,58	385,28
13	83,50	91,14	207,12	381,76
14	92,32	83,48	197,12	372,92
15	65,95	91,92	184,48	342,35
16	62,71	85,36	190,54	338,61
17	63,65	104,78	177,33	345,76
18	90,73	75,68	184,24	350,65
19	68,65	83,40	242,60	394,65
20	74,42	99,57	233,29	407,28
21	75,29	108,85	207,59	391,73
22	81,30	73,46	218,33	373,09
23	75,34	121,66	204,29	401,29
24	75,38	99,39	216,38	391,15

Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* diperoleh pembangkitan tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya seperti pada Tabel 4.5. Kemudian total pembangkitan *hydro* tiap jamnya ini yang menentukan total pembangkitan *thermal* tiap jam, sehingga keseluruhan daya yang dibangkitkan mampu memikul beban.



**Tabel 4.6** Hasil Optimasi Pembangkitan *Thermal* 24 Jam pada Kasus 1.

Jam	Power Generation (MW)						
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	PT
1	208,63	427,44	130,00	47,00	20,00	55,00	888,07
2	184,77	429,38	129,00	47,00	20,00	55,00	865,15
3	178,00	427,38	128,68	47,00	20,00	55,00	856,06
4	187,41	426,92	128,76	47,00	20,00	55,00	865,09
5	216,47	440,69	128,69	47,00	20,00	55,00	907,85
6	175,81	417,51	127,99	47,00	20,00	55,00	843,31
7	180,73	419,40	130,00	47,00	20,00	55,00	852,13
8	297,29	425,48	128,96	47,00	20,00	55,00	973,73
9	301,35	434,39	128,88	47,00	20,00	55,00	986,62
10	324,84	458,12	128,70	47,00	20,00	55,00	1033,66
11	327,93	451,78	128,70	47,00	20,00	55,00	1030,41
12	242,52	447,37	128,66	47,00	20,00	55,00	940,55
13	304,43	430,72	130,00	47,00	20,00	55,00	987,15
14	332,34	458,45	130,00	47,00	20,00	55,00	1042,79
15	352,39	460,00	130,00	47,00	20,00	55,00	1064,39
16	363,73	458,47	130,00	47,00	20,00	55,00	1074,20
17	390,83	457,91	130,00	47,00	20,00	55,00	1100,74
18	470,00	460,00	130,00	95,61	20,00	55,00	1230,61
19	470,00	460,00	130,00	58,99	20,00	55,00	1193,99
20	431,30	460,00	130,00	47,00	20,00	55,00	1143,30
21	382,11	458,44	130,00	47,00	20,00	55,00	1092,55
22	317,60	449,00	128,86	47,00	20,00	55,00	1017,46
23	238,50	437,25	128,82	47,00	20,00	55,00	926,57
24	203,75	428,53	130,00	47,00	20,00	55,00	884,28

Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* diperoleh pembangkitan tiap unit *thermal* untuk setiap jamnya seperti pada Tabel 4.6. Kemudian total pembangkitan tiap jamnya digunakan untuk mencukupi kebutuhan beban.

**Tabel 4.7** Hasil Biaya Pembangkit *Thermal* 24 Jam pada Kasus 1.

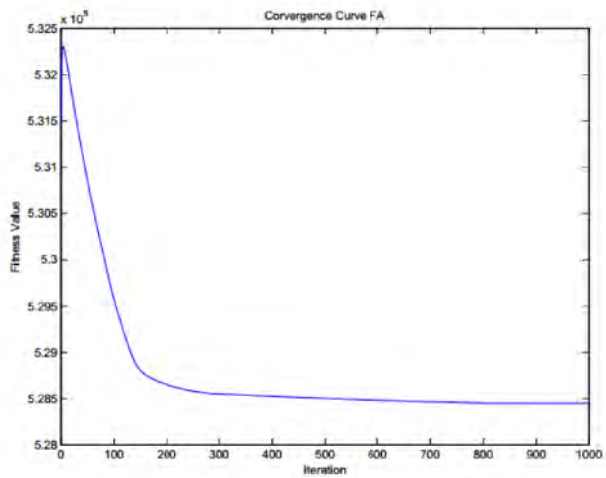
Jam	Pembangkitan Daya (MW)	Biaya Pembangkitan (\$)
1	888,07	23187,68
2	865,15	22693,18
3	856,06	22497,17
4	865,09	22693,33
5	907,85	23622,26
6	843,31	22224,64

Jam	Pembangkitan Daya (MW)	Biaya Pembangkitan (\$)
7	852,13	22407,07
8	973,73	25062,12
9	986,62	25341,94
10	1033,66	26365,54
11	1030,41	26295,81
12	940,55	24334,30
13	987,15	25349,06
14	1042,79	26558,93
15	1064,39	27031,23
16	1074,20	27246,54
17	1100,74	27828,79
18	1230,61	30775,85
19	1193,99	29897,84
20	1143,30	28762,40
21	1092,55	27648,88
22	1017,46	26012,30
23	926,57	24030,42
24	884,28	23105,12
<b>Total</b>	<b>23800,66</b>	<b>610972,39</b>

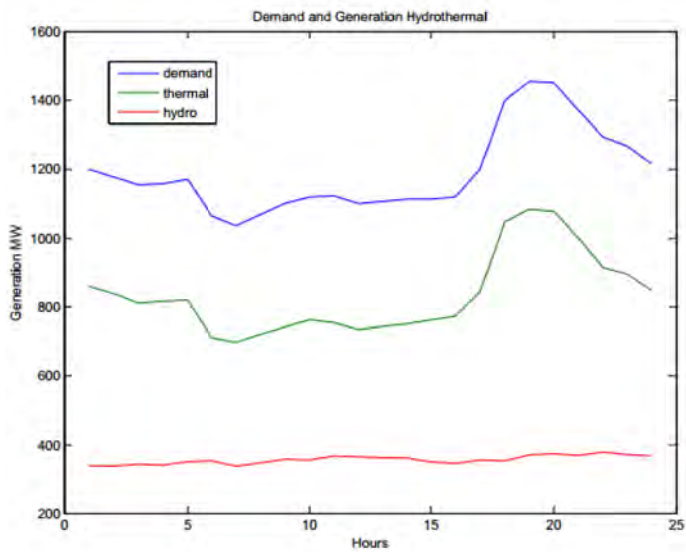
Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* pada kasus 1 diperoleh total pembangkitan unit *thermal* 23800,66 MW selama satu hari. Sedangkan biaya total yang diperlukan pembangkitan berdasarkan simulasi dengan *Firefly algorithm* sebesar \$ 610972.39.

#### 4.3.2 Hasil Simulasi Kasus 2

Dapat dilihat pada Gambar 4.5, ketika iterasi ke- 800 grafik sudah lurus tidak mengalami pergeseran nilai sampai iterasi 1000. Hal ini menggambarkan bahwa mulai iterasi ke- 800 *fitness value* sudah mencapai titik konvergensi dari koordinasi *hydrothermal*. Titik konvergensi ini menggambarkan bahwa hasil yang optimum sudah dicapai.

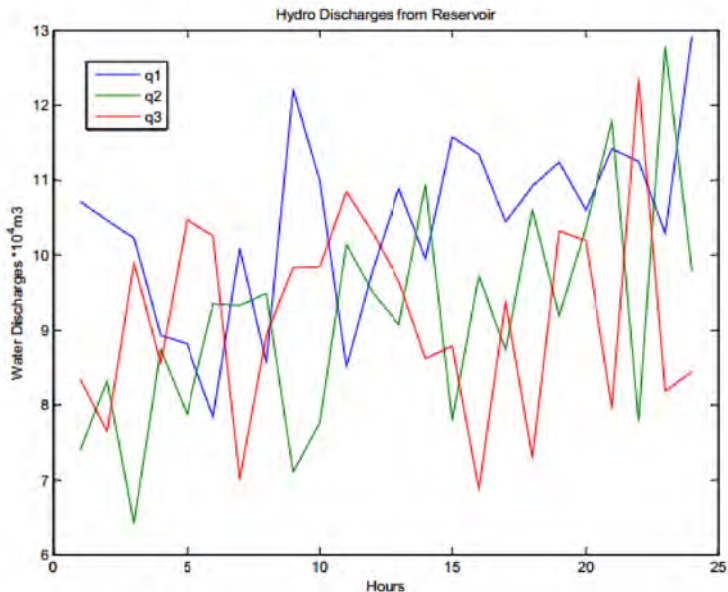


**Gambar 4.5** Kurva Korvengensi Koordinasi *Hydrothermal* FA pada Kasus 2.



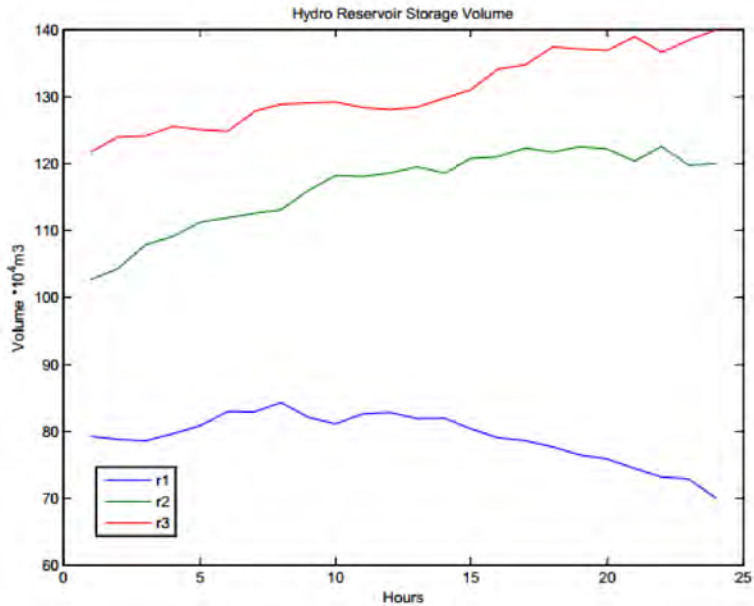
**Gambar 4.6** Kurva Pembebanan dan Pembangkitan *Hydrothermal* selama 24 Jam pada Kasus 2.

Pada Gambar 4.6 menggambarkan kurva pembebanan pada kasus 2 dan hasil pembangkitan *hydrothermal* selama 24 jam. Pada kasus 2 ini menggambarkan profil beban pada saat *weekend*. Grafik biru merupakan kurva pembebanan. Grafik ini sedikit mirip dengan kasus 1, terutama di periode jam 17.00 ke atas, saat terjadinya beban puncak. Perbedaannya, grafik di siang hari relatif rata, tidak ada fluktuasi di jam 12.00 - 13.00 siang, karena tidak ada perubahan aktivitas. Perbedaan yang paling signifikan adalah besaran beban, beban puncak di malam hari sekitar 1400an MW, sedang siang harinya hanya 1100an MW ada selisih sekitar 200-300 MW, ini adalah jumlah yang besar. Kemudian untuk memikul beban-beban tersebut selama 24 jam unit *hydro* yang di grafik warna merah dibangkitkan untuk memikul beban dasar. Sisanya untuk memenuhi beban tersebut unit *thermal* dibangkitkan agar pembangkitan total mampu memikul keseluruhan beban.



**Gambar 4.7** Kurva *Water discharges* Unit *Hydro* selama 24 Jam pada Kasus 2.

Dapat dilihat Gambar 4.7 merupakan kurva air yang keluar dari *reservoir* melalui *penstock* menuju turbin untuk memutar generator. Jumlah air yang keluar ini ekuivalen dengan daya aktif yang dibangkitkan generator.



**Gambar 4.8** Kurva *Volume Reservoir* Unit *Hydro* selama 24 Jam pada Kasus 2.

Perhatikan Gambar 4.8 untuk grafik unit *hydro* 1 warna biru, nilai akhirnya turun terhadap nilai awal. Sedangkan pada grafik unit *hydro* 2 warna hijau dan 3 warna merah, nilai akhirnya naik terhadap nilai awal. Hal ini dikarenakan *volume* akhir yang ditentukan pada unit 2 dan 3 memang lebih tinggi dari pada *volume* awal yang ditentukan. Sedangkan pada unit 1 *volume* akhir yang ditentukan lebih kecil dari *volume* awal. Hal tersebut menggambarkan koordinasi pada jam terakhir mampu mencapai *volume* akhir yang ditentukan.

Untuk melihat keseimbangan *reservoir* kita perlu membandingkan Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Dimana Gambar 4.8 merupakan kurva perubahan *volume reservoir* selama 24 jam. Untuk unit *hydro* 1 di gambarkan kurva warna biru, dapat dilihat pada jam 9 air yang keluar pada Gambar 4.7 melonjak tajam, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.8 berangsur-angsur turun. Demikian pula pada unit *hydro* 2 di gambarkan kurva warna hijau, dapat dilihat pada jam 3 air yang keluar pada Gambar 4.7 sedikit, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.8 berangsur-angsur naik, karena air yang dikeluarkan sedikit namun debit air yang masuk tetap sama. Hal yang sama pula terjadi pada unit *hydro* 3 digambarkan kurva warna merah, dapat dilihat pada jam 7 air yang keluar pada Gambar 4.7 sedikit, sehingga *volume reservoir* pada Gambar 4.8 naik, karena air yang dikeluarkan sedikit namun debit air yang masuk tetap sama.

**Tabel 4.8** Hasil *Water discharge Reservoir* setiap Jam.

Jam	<i>Water discharge of Reservoir</i> Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
1	10,76	7,44	8,40
2	10,53	8,39	7,73
3	10,22	6,41	9,88
4	8,96	8,77	8,59
5	8,77	7,82	10,42
6	7,80	9,31	10,20
7	10,09	9,33	7,02
8	8,53	9,44	8,89
9	12,17	7,06	9,78
10	11,02	7,80	9,88
11	8,59	10,21	10,93
12	9,77	9,45	10,25
13	10,94	9,12	9,70
14	10,00	10,99	8,69
15	11,60	7,82	8,82
16	11,29	9,68	6,81
17	10,45	8,74	9,39
18	10,89	10,58	7,26
19	11,24	9,19	10,32
20	10,62	10,39	10,22

**Tabel 4.9** Hasil *Volume Storage Reservoir* setiap Jam.

Jam	<i>Volume Storage of Reservoir</i> Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
1	79,24	102,56	121,60
2	78,71	104,71	123,88
3	78,50	107,76	124,00
4	79,54	108,99	125,41
5	80,77	111,16	124,99
6	82,97	111,86	124,79
7	82,89	112,53	127,76
8	84,36	113,09	128,88
9	82,19	116,03	129,10
10	81,17	118,23	129,22
11	82,59	118,02	128,29
12	82,82	118,57	128,05
13	81,88	119,44	128,35
14	81,87	118,45	129,66
15	80,28	120,63	130,84
16	78,99	120,95	134,03
17	78,54	122,21	134,64
18	77,64	121,63	137,37
19	76,40	122,45	137,05
20	75,78	122,06	136,83

<i>Water discharge of Reservoir</i>			
Jam	Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
21	11,43	11,81	7,98
22	11,22	7,76	12,31
23	10,23	12,73	8,12
24	12,89	9,75	8,42

<i>Volume Storage of Reservoir</i>			
Jam	Unit (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		
	1	2	3
21	74,35	120,25	138,85
22	73,12	122,49	136,54
23	72,89	119,76	138,42
24	70,00	120,00	140,00

Dari hasil simulasi diperoleh *water discharge* tiap unit untuk setiap jam pada Tabel 4.8 yang nilainya *equivalen* dengan daya yang dibangkitkan. Kemudian Tabel 4.9 menggambarkan perubahan *volume* dan ketersediaan air dalam *reservoir* pada setiap jam.

**Tabel 4.10** Hasil Pembangkitan Unit *Hydro* selama 24 Jam pada Kasus 2.

<b>Total Pembangkitan <i>Hydro</i></b>				
Jam	Unit (MW)			
	1	2	3	PH
1	75,23	71,32	194,12	340,67
2	74,05	77,63	188,44	340,12
3	72,40	64,46	206,69	343,55
4	65,81	80,16	195,77	341,74
5	64,82	73,87	211,26	349,95
6	59,73	83,74	209,42	352,89
7	71,73	83,89	182,47	338,09
8	63,56	84,66	198,27	346,49
9	82,60	68,77	205,81	357,18
10	76,62	73,72	206,71	357,05
11	63,86	89,77	215,57	369,20
12	70,06	84,72	209,82	364,60
13	76,18	82,54	205,18	363,90
14	71,28	94,99	196,58	362,85
15	79,63	73,84	197,68	351,15
16	78,03	86,21	180,70	344,94
17	73,62	79,98	202,57	356,17
18	75,93	92,23	184,51	352,67
19	77,77	82,96	210,46	371,19
20	74,54	90,97	209,57	375,08
21	78,77	100,43	190,61	369,81
22	77,66	73,45	227,29	378,40
23	72,48	106,58	191,76	370,82
24	86,42	86,75	194,30	367,47

Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* diperoleh pembangkitan tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya seperti pada Tabel 4.10. Kemudian total pembangkitan *hydro* tiap jamnya ini yang menentukan total pembangkitan *thermal* tiap jam, sehingga keseluruhan daya yang dibangkitkan mampu memikul beban.

**Tabel 4.11** Hasil Optimasi Pembangkitan *Thermal* 24 Jam pada Kasus 2.

Jam	Power Generation (MW)						
	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	PT
1	204,69	402,56	130,00	47,00	20,00	55,00	859,25
2	199,47	387,20	128,53	47,00	20,00	55,00	837,20
3	183,74	376,58	128,76	47,00	20,00	55,00	811,08
4	193,80	370,51	130,00	47,00	20,00	55,00	816,31
5	192,23	377,65	128,99	47,00	20,00	55,00	820,87
6	150,00	310,78	128,74	47,00	20,00	55,00	711,52
7	150,00	296,23	128,61	47,00	20,00	55,00	696,84
8	150,00	320,37	128,88	47,00	20,00	55,00	721,25
9	167,82	322,84	130,00	47,00	20,00	55,00	742,66
10	176,94	333,14	130,00	47,00	20,00	55,00	762,08
11	151,53	350,03	130,00	47,00	20,00	55,00	753,56
12	157,56	326,92	130,00	47,00	20,00	55,00	736,48
13	162,38	328,39	130,00	47,00	20,00	55,00	742,77
14	163,56	334,53	130,00	47,00	20,00	55,00	750,09
15	171,04	339,74	128,56	47,00	20,00	55,00	761,34
16	184,77	338,89	128,63	47,00	20,00	55,00	774,29
17	192,74	400,21	128,22	47,00	20,00	55,00	843,17
18	364,37	431,80	128,87	47,00	20,00	55,00	1047,04
19	387,38	444,28	130,00	47,00	20,00	55,00	1083,66
20	375,55	448,79	130,00	47,00	20,00	55,00	1076,34
21	320,51	428,37	130,00	47,00	20,00	55,00	1000,88
22	241,64	421,61	130,00	47,00	20,00	55,00	915,25
23	231,74	414,41	128,32	47,00	20,00	55,00	896,47
24	197,65	398,88	130,00	47,00	20,00	55,00	848,53

Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* diperoleh pembangkitan tiap unit *thermal* untuk setiap jamnya seperti pada Tabel 4.11. Kemudian total pembangkitan tiap jamnya digunakan untuk mencukupi kebutuhan beban.



**Tabel 4.12** Hasil Biaya Pembangkit *Thermal* 24 Jam pada Kasus 2.

Jam	Pembangkitan Daya (MW)	Biaya Pembangkitan (\$)
1	859,25	22565,11
2	837,20	22095,61
3	811,08	21528,64
4	816,31	21637,92
5	820,87	21740,26
6	711,52	19389,86
7	696,84	19066,78
8	721,25	19577,31
9	742,66	20048,29
10	762,08	20467,95
11	753,56	20278,36
12	736,48	19912,96
13	742,77	20049,30
14	750,09	20206,90
15	761,34	20456,73
16	774,29	20738,37
17	843,17	22224,08
18	1047,04	26665,05
19	1083,66	27458,30
20	1076,34	27296,40
21	1000,88	25649,78
22	915,25	23781,33
23	896,47	23381,55
24	848,53	22332,70
<b>Total</b>	<b>20008,93</b>	<b>528540,55</b>

Dari hasil simulasi koordinasi *hydrothermal* pada kasus 2 diperoleh total pembangkitan unit *thermal* 20008,93 MW selama satu hari. Sedangkan biaya total yang diperlukan pembangkitan berdasarkan simulasi dengan *Firefly Algorithm* sebesar \$ 528540,55.

#### 4.4 Analisa Simulasi

Setelah mendapatkan hasil koordinasi *hydrothermal* dari proses simulasi menggunakan *firefly algorithm*, data yang didapatkan di analisa apakah hasil sudah sesuai dengan batasan - batasan yang disepakati atau ada anomali-anomali yang lain.

#### 4.4.1 Analisa Simulasi Kasus 1

**Tabel 4.13** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Hydro* pada Kasus 1.

Jam	Pembangkitan <i>Hydro</i> (MW)								
	PH <sub>1</sub>	P <sub>max</sub>	ket	PH <sub>2</sub>	P <sub>max</sub>	ket	PH <sub>3</sub>	P <sub>max</sub>	ket
1	60,78	200	√	64,21	250	√	202,52	300	√
2	80,45	200	√	65,02	250	√	183,07	300	√
3	75,28	200	√	68,34	250	√	181,45	300	√
4	65,74	200	√	68,03	250	√	191,47	300	√
5	53,36	200	√	70,86	250	√	208,12	300	√
6	63,90	200	√	74,43	250	√	196,26	300	√
7	60,39	200	√	66,83	250	√	186,20	300	√
8	59,05	200	√	57,77	250	√	196,46	300	√
9	91,58	200	√	81,47	250	√	184,17	300	√
10	86,53	200	√	73,13	250	√	193,90	300	√
11	83,07	200	√	91,57	250	√	204,08	300	√
12	73,44	200	√	87,26	250	√	224,58	300	√
13	83,50	200	√	91,14	250	√	207,12	300	√
14	92,32	200	√	83,48	250	√	197,12	300	√
15	65,95	200	√	91,92	250	√	184,48	300	√
16	62,71	200	√	85,36	250	√	190,54	300	√
17	63,65	200	√	104,78	250	√	177,33	300	√
18	90,73	200	√	75,68	250	√	184,24	300	√
19	68,65	200	√	83,40	250	√	242,60	300	√
20	74,42	200	√	99,57	250	√	233,29	300	√
21	75,29	200	√	108,85	250	√	207,59	300	√
22	81,30	200	√	73,46	250	√	218,33	300	√
23	75,34	200	√	121,66	250	√	204,29	300	√
24	75,38	200	√	99,39	250	√	216,38	300	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum pembangkitan unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.8. Daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Untuk batasan minimum semua unit *hydro* adalah 0 MW, karena keterbatasan dimensi Tabel maka tidak ditampilkan pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.14** Analisa Batasan *Water discharges* Maksimum dan Minimum *Hydro* pada Kasus 1.

Jam	<i>Water discharges</i> (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )								
	Q 1	Q <sub>max</sub>	ket	Q 2	Q <sub>max</sub>	ket	Q 3	Q <sub>max</sub>	ket
1	8,00	34.588	√	6,38	34.244	√	9,39	20.89	√
2	11,75	34.588	√	6,50	34.244	√	7,09	20.89	√
3	10,77	34.588	√	6,99	34.244	√	6,90	20.89	√
4	8,94	34.588	√	6,95	34.244	√	8,08	20.89	√
5	6,58	34.588	√	7,37	34.244	√	10,05	20.89	√
6	8,59	34.588	√	7,91	34.244	√	8,65	20.89	√
7	7,92	34.588	√	6,77	34.244	√	7,46	20.89	√
8	7,67	34.588	√	5,41	34.244	√	8,67	20.89	√
9	13,88	34.588	√	8,96	34.244	√	7,22	20.89	√
10	12,91	34.588	√	7,71	34.244	√	8,37	20.89	√
11	12,25	34.588	√	10,48	34.244	√	9,57	20.89	√
12	10,42	34.588	√	9,83	34.244	√	11,99	20.89	√
13	12,34	34.588	√	10,42	34.244	√	9,93	20.89	√
14	14,02	34.588	√	9,27	34.244	√	8,75	20.89	√
15	8,98	34.588	√	10,53	34.244	√	7,26	20.89	√
16	8,36	34.588	√	9,55	34.244	√	7,97	20.89	√
17	8,55	34.588	√	12,46	34.244	√	6,42	20.89	√
18	13,72	34.588	√	8,10	34.244	√	7,23	20.89	√
19	9,50	34.588	√	9,25	34.244	√	14,12	20.89	√
20	10,60	34.588	√	11,68	34.244	√	13,02	20.89	√
21	10,77	34.588	√	13,07	34.244	√	9,99	20.89	√
22	11,92	34.588	√	7,76	34.244	√	11,25	20.89	√
23	10,78	34.588	√	14,99	34.244	√	9,60	20.89	√
24	10,79	34.588	√	11,65	34.244	√	11,02	20.89	√
	250,01	Total Q 1		219,99	Total Q 2		220	Total Q 3	

**Tabel 4.15** Analisa Kesesuaian Air yang Bisa digunakan dengan Air yang digunakan pada Kasus 1.

Unit	Total Air yang bisa digunakan 24 Jam $Q_{tot} = V_{ini} - V_{fin} + 24 \cdot I$	Q <sub>tot</sub> "simulasi"	error
<i>Hydro 1</i>	250	250,01	4,00*10 <sup>-5</sup>
<i>Hydro 2</i>	220	219,99	4,54*10 <sup>-5</sup>
<i>Hydro 3</i>	220	220	0
semua dalam *10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>			

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *water discharge* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.14. Air yang keluar dari *reservoir* menuju *penstock* tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar

batasan maksimum maupun minimum. Untuk batasan minimum *water discharge* semua unit *hydro* adalah 0 m<sup>3</sup>/jam karena keterbatasan dimensi Tabel maka tidak ditampilkan pada Tabel 4.14.

Dapat dilihat pada Tabel 4.15 perbandingan antara perhitungan total air yang bisa digunakan dengan total air yang benar-benar digunakan berdasarkan hasil simulasi Tabel 4.16. Hal ini digunakan untuk melihat kesesuaian hasil yang dicapai. Pada unit 1 *error* yang didapatkan 0,004%, kemudian pada unit 2 *error* sebesar 0.00454%, dan untuk unit 3 *error* sebesar 0%.

**Tabel 4.16** Analisa Batasan *Volume Storage* Maksimum dan Minimum *Reservoir* 1&2 pada Kasus 1.

Jam	<i>Volume Storage Reservoir (*10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)</i>							
	<i>V<sub>min</sub></i>	<i>V</i> 1	<i>V<sub>max</sub></i>	ket	<i>V<sub>min</sub></i>	<i>V</i> 2	<i>V<sub>max</sub></i>	ket
1	60	82,00	120	✓	80	103,62	150	✓
2	60	80,25	120	✓	80	107,13	150	✓
3	60	79,48	120	✓	80	110,13	150	✓
4	60	80,54	120	✓	80	113,18	150	✓
5	60	83,96	120	✓	80	115,81	150	✓
6	60	85,37	120	✓	80	117,90	150	✓
7	60	87,45	120	✓	80	121,13	150	✓
8	60	89,78	120	✓	80	125,72	150	✓
9	60	85,90	120	✓	80	126,76	150	✓
10	60	82,99	120	✓	80	129,05	150	✓
11	60	80,73	120	✓	80	128,57	150	✓
12	60	80,32	120	✓	80	128,73	150	✓
13	60	77,98	120	✓	80	128,32	150	✓
14	60	73,96	120	✓	80	129,05	150	✓
15	60	74,98	120	✓	80	128,52	150	✓
16	60	76,61	120	✓	80	128,97	150	✓
17	60	78,07	120	✓	80	126,51	150	✓
18	60	74,35	120	✓	80	128,41	150	✓
19	60	74,85	120	✓	80	129,16	150	✓
20	60	74,25	120	✓	80	127,48	150	✓
21	60	73,48	120	✓	80	124,41	150	✓
22	60	71,56	120	✓	80	126,65	150	✓
23	60	70,79	120	✓	80	121,65	150	✓
24	60	70,00	120	✓	80	120,00	150	✓

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *volume reservoir* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.16. Jumlah ketersediaan air dalam *reservoir* tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Kemudian *volume* akhir yang diinginkan juga tercapai untuk setiap unitnya yaitu *hydro* unit 1 sebesar  $70 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  sedangkan *hydro* unit 2 sebesar  $120 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ .

**Tabel 4.17** Analisa Batasan *Volume Storage* Maksimum dan Minimum *Reservoir* 3 pada Kasus 1.

Jam	<i>Volume Storage Reservoir</i> ( $\cdot 10^4 \text{ m}^3$ )			
	$V_{\min}$	V 3	$V_{\max}$	ket
1	70	120,61	160	√
2	70	123,52	160	√
3	70	126,62	160	√
4	70	128,54	160	√
5	70	128,49	160	√
6	70	129,84	160	√
7	70	132,38	160	√
8	70	133,70	160	√
9	70	136,48	160	√
10	70	138,11	160	√
11	70	138,54	160	√
12	70	136,55	160	√
13	70	136,62	160	√
14	70	137,87	160	√
15	70	140,61	160	√
16	70	142,64	160	√
17	70	146,22	160	√
18	70	148,99	160	√
19	70	144,88	160	√
20	70	141,86	160	√
21	70	141,87	160	√
22	70	140,62	160	√
23	70	141,02	160	√
24	70	140,00	160	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *volume reservoir* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.17. Jumlah ketersediaan air dalam *reservoir*

tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Kemudian *volume* akhir yang diinginkan juga tercapai untuk setiap unitnya yaitu *hydro* unit 3 sebesar  $140 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ .

**Tabel 4.18** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal* 1&2 pada Kasus 1.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T 1	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T 2	P <sub>max</sub>	ket
1	150	208,63	470	√	135	427,44	460	√
2	150	184,77	470	√	135	429,38	460	√
3	150	178,00	470	√	135	427,38	460	√
4	150	187,41	470	√	135	426,92	460	√
5	150	216,47	470	√	135	440,69	460	√
6	150	175,81	470	√	135	417,51	460	√
7	150	180,73	470	√	135	419,40	460	√
8	150	297,29	470	√	135	425,48	460	√
9	150	301,35	470	√	135	434,39	460	√
10	150	324,84	470	√	135	458,12	460	√
11	150	327,93	470	√	135	451,78	460	√
12	150	242,52	470	√	135	447,37	460	√
13	150	304,43	470	√	135	430,72	460	√
14	150	332,34	470	√	135	458,45	460	√
15	150	352,39	470	√	135	460,00	460	max
16	150	363,73	470	√	135	458,47	460	√
17	150	390,83	470	√	135	457,91	460	√
18	150	470,00	470	max	135	460,00	460	max
19	150	470,00	470	max	135	460,00	460	max
20	150	431,30	470	√	135	460,00	460	max
21	150	382,11	470	√	135	458,44	460	√
22	150	317,60	470	√	135	449,00	460	√
23	150	238,50	470	√	135	437,25	460	√
24	150	203,75	470	√	135	428,53	460	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.18. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Walaupun ada beberapa di nilai batas maksimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit yang dibangkitkan maksimum memiliki biaya yang lebih murah dari pada unit lain.

**Tabel 4.19** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal 3&4* pada Kasus 1.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T <sub>3</sub>	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T <sub>4</sub>	P <sub>max</sub>	ket
1	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
2	20	129,00	130	√	47	47,00	120	min
3	20	128,68	130	√	47	47,00	120	min
4	20	128,76	130	√	47	47,00	120	min
5	20	128,69	130	√	47	47,00	120	min
6	20	127,99	130	√	47	47,00	120	min
7	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
8	20	128,96	130	√	47	47,00	120	min
9	20	128,88	130	√	47	47,00	120	min
10	20	128,70	130	√	47	47,00	120	min
11	20	128,70	130	√	47	47,00	120	min
12	20	128,66	130	√	47	47,00	120	min
13	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
14	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
15	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
16	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
17	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
18	20	130,00	130	max	47	95,61	120	√
19	20	130,00	130	max	47	58,99	120	√
20	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
21	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
22	20	128,86	130	√	47	47,00	120	min
23	20	128,82	130	√	47	47,00	120	min
24	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.19. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Walaupun ada beberapa di nilai batas maksimum dan minimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit yang dibangkitkan maksimum memiliki biaya yang lebih murah, sedangkan unit yang dibangkitkan minimum memiliki biaya yang lebih mahal.

**Tabel 4.20** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal* 4&5 pada Kasus 1.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T <sub>5</sub>	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T <sub>6</sub>	P <sub>max</sub>	ket
1	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
2	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
3	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
4	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
5	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
6	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
7	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
8	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
9	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
10	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
11	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
12	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
13	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
14	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
15	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
16	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
17	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
18	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
19	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
20	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
21	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
22	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
23	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
24	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.20. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Namun semua berada di nilai batas minimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit ini memiliki biaya yang mahal. Namun untuk unit *thermal* 6 memiliki kasus yang berbeda karena nilai pembangkitan maksimum dan minimum di set pada nilai yang sama jadi pembangkit *thermal* 6 hanya mampu membangkitkan sebesar 55MW konstan.



#### 4.4.2 Analisa Simulasi Kasus 2

**Tabel 4.21** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Hydro* pada Kasus 2.

Jam	Pembangkitan <i>Hydro</i> (MW)								
	PH <sub>1</sub>	P <sub>max</sub>	ket	PH <sub>2</sub>	P <sub>max</sub>	ket	PH <sub>3</sub>	P <sub>max</sub>	ket
1	75,23	200	√	71,32	250	√	194,12	300	√
2	74,05	200	√	77,63	250	√	188,44	300	√
3	72,40	200	√	64,46	250	√	206,69	300	√
4	65,81	200	√	80,16	250	√	195,77	300	√
5	64,82	200	√	73,87	250	√	211,26	300	√
6	59,73	200	√	83,74	250	√	209,42	300	√
7	71,73	200	√	83,89	250	√	182,47	300	√
8	63,56	200	√	84,66	250	√	198,27	300	√
9	82,60	200	√	68,77	250	√	205,81	300	√
10	76,62	200	√	73,72	250	√	206,71	300	√
11	63,86	200	√	89,77	250	√	215,57	300	√
12	70,06	200	√	84,72	250	√	209,82	300	√
13	76,18	200	√	82,54	250	√	205,18	300	√
14	71,28	200	√	94,99	250	√	196,58	300	√
15	79,63	200	√	73,84	250	√	197,68	300	√
16	78,03	200	√	86,21	250	√	180,70	300	√
17	73,62	200	√	79,98	250	√	202,57	300	√
18	75,93	200	√	92,23	250	√	184,51	300	√
19	77,77	200	√	82,96	250	√	210,46	300	√
20	74,54	200	√	90,97	250	√	209,57	300	√
21	78,77	200	√	100,43	250	√	190,61	300	√
22	77,66	200	√	73,45	250	√	227,29	300	√
23	72,48	200	√	106,58	250	√	191,76	300	√
24	86,42	200	√	86,75	250	√	194,30	300	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum pembangkitan unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.21. Daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Untuk batasan minimum semua unit *hydro* adalah 0 MW, karena keterbatasan dimensi Tabel maka tidak ditampilkan pada Tabel 4.21.

**Tabel 4.22** Analisa Batasan *Water discharges* Maksimum dan Minimum *Hydro* pada Kasus 2.

Jam	<i>Water discharges</i> (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )								
	Q 1	Q <sub>max</sub>	ket	Q 2	Q <sub>max</sub>	ket	Q 3	Q <sub>max</sub>	ket
1	10,76	34.588	✓	7,44	34.244	✓	8,40	20.89	✓
2	10,53	34.588	✓	8,39	34.244	✓	7,73	20.89	✓
3	10,22	34.588	✓	6,41	34.244	✓	9,88	20.89	✓
4	8,96	34.588	✓	8,77	34.244	✓	8,59	20.89	✓
5	8,77	34.588	✓	7,82	34.244	✓	10,42	20.89	✓
6	7,80	34.588	✓	9,31	34.244	✓	10,20	20.89	✓
7	10,09	34.588	✓	9,33	34.244	✓	7,02	20.89	✓
8	8,53	34.588	✓	9,44	34.244	✓	8,89	20.89	✓
9	12,17	34.588	✓	7,06	34.244	✓	9,78	20.89	✓
10	11,02	34.588	✓	7,80	34.244	✓	9,88	20.89	✓
11	8,59	34.588	✓	10,21	34.244	✓	10,93	20.89	✓
12	9,77	34.588	✓	9,45	34.244	✓	10,25	20.89	✓
13	10,94	34.588	✓	9,12	34.244	✓	9,70	20.89	✓
14	10,00	34.588	✓	10,99	34.244	✓	8,69	20.89	✓
15	11,60	34.588	✓	7,82	34.244	✓	8,82	20.89	✓
16	11,29	34.588	✓	9,68	34.244	✓	6,81	20.89	✓
17	10,45	34.588	✓	8,74	34.244	✓	9,39	20.89	✓
18	10,89	34.588	✓	10,58	34.244	✓	7,26	20.89	✓
19	11,24	34.588	✓	9,19	34.244	✓	10,32	20.89	✓
20	10,62	34.588	✓	10,39	34.244	✓	10,22	20.89	✓
21	11,43	34.588	✓	11,81	34.244	✓	7,98	20.89	✓
22	11,22	34.588	✓	7,76	34.244	✓	12,31	20.89	✓
23	10,23	34.588	✓	12,73	34.244	✓	8,12	20.89	✓
24	12,89	34.588	✓	9,75	34.244	✓	8,42	20.89	✓
	250,01	Total Q 1		219,99	Total Q 2		220,01	Total Q 3	

**Tabel 4.23** Analisa Kesesuaian Air yang Bisa digunakan dengan Air yang digunakan pada Kasus 2.

Unit	Total Air yang bisa digunakan 24 Jam $Q_{tot} = V_{ini} - V_{fin} + 24 \cdot I$	Q <sub>tot</sub> "simulasi"	error
<i>Hydro 1</i>	250	250,01	4,00*10 <sup>-5</sup>
<i>Hydro 2</i>	220	219,99	4,54*10 <sup>-5</sup>
<i>Hydro 3</i>	220	220,01	4,54*10 <sup>-5</sup>
semua dalam *10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>			

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *water discharge* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.22. Air yang keluar dari *reservoir* menuju *penstock* tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar

batasan maksimum maupun minimum. Untuk batasan minimum *water discharge* semua unit *hydro* adalah 0 m<sup>3</sup>/jam karena keterbatasan dimensi Tabel maka tidak ditampilkan pada Tabel 4.22.

Dapat dilihat pada Tabel 4.23 perbandingan antara perhitungan total air yang bisa digunakan dengan total air yang benar-benar digunakan berdasarkan hasil simulasi Tabel 4.22. Hal ini digunakan untuk melihat kesesuaian hasil yang dicapai. Pada unit 1 *error* yang didapatkan 0,004%, kemudian pada unit 2 *error* sebesar 0.00454%, dan untuk unit 3 *error* sebesar 0.00454%.

**Tabel 4.24** Analisa Batasan *Volume Storage* Maksimum dan Minimum *Reservoir* 1&2 pada Kasus 2.

Jam	<i>Volume Storage Reservoir (*10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>)</i>							
	V <sub>min</sub>	V 1	V <sub>max</sub>	ket	V <sub>min</sub>	V 2	V <sub>max</sub>	ket
1	60	79,24	120	√	80	102,56	150	√
2	60	78,71	120	√	80	104,71	150	√
3	60	78,50	120	√	80	107,76	150	√
4	60	79,54	120	√	80	108,99	150	√
5	60	80,77	120	√	80	111,16	150	√
6	60	82,97	120	√	80	111,86	150	√
7	60	82,89	120	√	80	112,53	150	√
8	60	84,36	120	√	80	113,09	150	√
9	60	82,19	120	√	80	116,03	150	√
10	60	81,17	120	√	80	118,23	150	√
11	60	82,59	120	√	80	118,02	150	√
12	60	82,82	120	√	80	118,57	150	√
13	60	81,88	120	√	80	119,44	150	√
14	60	81,87	120	√	80	118,45	150	√
15	60	80,28	120	√	80	120,63	150	√
16	60	78,99	120	√	80	120,95	150	√
17	60	78,54	120	√	80	122,21	150	√
18	60	77,64	120	√	80	121,63	150	√
19	60	76,40	120	√	80	122,45	150	√
20	60	75,78	120	√	80	122,06	150	√
21	60	74,35	120	√	80	120,25	150	√
22	60	73,12	120	√	80	122,49	150	√
23	60	72,89	120	√	80	119,76	150	√
24	60	70,00	120	√	80	120,00	150	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *volume reservoir* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.24. Jumlah ketersediaan air dalam *reservoir* tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Kemudian *volume* akhir yang diinginkan juga tercapai untuk setiap unitnya yaitu *hydro* unit 1 sebesar  $70 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  sedangkan *hydro* unit 2 sebesar  $120 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ .

**Tabel 4.25** Analisa Batasan *Volume Storage* Maksimum dan Minimum *Reservoir* 3 pada Kasus 2.

Jam	<i>Volume Storage Reservoir</i> (*10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )			
	V <sub>min</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>max</sub>	ket
1	70	121,60	160	✓
2	70	123,88	160	✓
3	70	124,00	160	✓
4	70	125,41	160	✓
5	70	124,99	160	✓
6	70	124,79	160	✓
7	70	127,76	160	✓
8	70	128,88	160	✓
9	70	129,10	160	✓
10	70	129,22	160	✓
11	70	128,29	160	✓
12	70	128,05	160	✓
13	70	128,35	160	✓
14	70	129,66	160	✓
15	70	130,84	160	✓
16	70	134,03	160	✓
17	70	134,64	160	✓
18	70	137,37	160	✓
19	70	137,05	160	✓
20	70	136,83	160	✓
21	70	138,85	160	✓
22	70	136,54	160	✓
23	70	138,42	160	✓
24	70	140,00	160	✓

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum *volume reservoir* unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.25. Jumlah ketersediaan air dalam *reservoir*

tiap unit *hydro* untuk setiap jamnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Kemudian *volume* akhir yang diinginkan juga tercapai untuk setiap unitnya yaitu *hydro* unit 3 sebesar  $140 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ .

**Tabel 4.26** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal* 1&2 pada Kasus 2.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T 1	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T 2	P <sub>max</sub>	ket
1	150	204,69	470	√	135	402,56	460	√
2	150	199,47	470	√	135	387,20	460	√
3	150	183,74	470	√	135	376,58	460	√
4	150	193,80	470	√	135	370,51	460	√
5	150	192,23	470	√	135	377,65	460	√
6	150	150,00	470	min	135	310,78	460	√
7	150	150,00	470	min	135	296,23	460	√
8	150	150,00	470	min	135	320,37	460	√
9	150	167,82	470	√	135	322,84	460	√
10	150	176,94	470	√	135	333,14	460	√
11	150	151,53	470	√	135	350,03	460	√
12	150	157,56	470	√	135	326,92	460	√
13	150	162,38	470	√	135	328,39	460	√
14	150	163,56	470	√	135	334,53	460	√
15	150	171,04	470	√	135	339,74	460	√
16	150	184,77	470	√	135	338,89	460	√
17	150	192,74	470	√	135	400,21	460	√
18	150	364,37	470	√	135	431,80	460	√
19	150	387,38	470	√	135	444,28	460	√
20	150	375,55	470	√	135	448,79	460	√
21	150	320,51	470	√	135	428,37	460	√
22	150	241,64	470	√	135	421,61	460	√
23	150	231,74	470	√	135	414,41	460	√
24	150	197,65	470	√	135	398,88	460	√

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum hasil daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.26. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Walaupun ada beberapa di nilai batas minimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit yang dibangkitkan minimum memiliki biaya yang lebih mahal dari pada unit lain.

**Tabel 4.27** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal* 3&4 pada Kasus 2.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T 3	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T 4	P <sub>max</sub>	ket
1	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
2	20	128,53	130	√	47	47,00	120	min
3	20	128,76	130	√	47	47,00	120	min
4	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
5	20	128,99	130	√	47	47,00	120	min
6	20	128,74	130	√	47	47,00	120	min
7	20	128,61	130	√	47	47,00	120	min
8	20	128,88	130	√	47	47,00	120	min
9	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
10	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
11	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
12	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
13	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
14	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
15	20	128,56	130	√	47	47,00	120	min
16	20	128,63	130	√	47	47,00	120	min
17	20	128,22	130	√	47	47,00	120	min
18	20	128,87	130	√	47	47,00	120	min
19	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
20	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
21	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
22	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min
23	20	128,32	130	√	47	47,00	120	min
24	20	130,00	130	max	47	47,00	120	min

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.27. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Walaupun ada beberapa di nilai batas maksimum dan minimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit yang dibangkitkan maksimum memiliki biaya yang lebih murah, sedangkan unit yang dibangkitkan minimum memiliki biaya yang lebih mahal.

**Tabel 4.28** Analisa Batasan Maksimum dan Minimum Pembangkit *Thermal 4&5* pada Kasus 2.

Jam	Power Generation (MW)							
	P <sub>min</sub>	T 5	P <sub>max</sub>	ket	P <sub>min</sub>	T 6	P <sub>max</sub>	ket
1	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
2	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
3	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
4	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
5	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
6	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
7	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
8	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
9	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
10	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
11	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
12	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
13	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
14	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
15	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
16	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
17	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
18	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
19	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
20	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
21	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
22	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
23	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min
24	20	20.00	80	min	55	55.00	55	min

Berdasarkan hasil simulasi dengan mempertimbangkan batasan maksimum-minimum daya yang dibangkitkan tiap unit *hydro* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.28. Daya yang dibangkitkan tiap unitnya tidak ada yang melanggar batasan maksimum maupun minimum. Namun semua berada di nilai batas minimum. Hal ini menggambarkan bahwa unit ini memiliki biaya yang mahal. Namun untuk unit *thermal 6* memiliki kasus yang berbeda karena nilai pembangkitan maksimum dan minimum di set pada nilai yang sama jadi pembangkit *thermal 6* hanya mampu membangkitkan sebesar 55MW konstan.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. *Firefly Algorithm* dapat diaplikasikan untuk melakukan koordinasi pembangkitan *hydrothermal* jangka pendek.
2. Koordinasi *hydrothermal* menggunakan *firefly algorithm* mampu memenuhi batasan-batasan yang telah disepakati.
3. Volume akhir yang diharapkan dapat terpenuhi untuk melakukan koordinasi di periode selanjutnya.
4. Total daya yang dibangkitkan pembangkit *thermal* pada kasus 1(*weekday*) sebesar 23800,66 MW sedangkan pada kasus 2 (*weekend*) sebesar 20008,93 MW.
5. Total biaya pembangkitan minimum pada kasus 1 (*weekday*) sebesar \$610972.39 sedangkan pada kasus 2 (*weekend*) sebesar \$528540,55.

#### **5.2 Saran**

Adapun beberapa saran untuk penelitian ke depan, yaitu :

1. Koordinasi *hydrothermal* dapat dilakukan dengan metode kecerdasan buatan yang lain, seperti GA, Cuckho, Bee Colony, Ant, ataupun PSO.
2. Koordinasi *hydrothermal* dapat dilakukan dengan mengadopsi kondisi dan sistem pembangkit yang nyata.
3. Perhitungan dan penentuan biaya operasi tiap unit pembangkit *thermal* dapat mempertimbangkan kerugian saluran transmisi dan *ramp rate* generator.



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saadat, Hadi., *“Power System Analysis 2nd Edition”*, McGrawHill, Ch.1, 1999.
- [2] Wood, A.J., dan Bruce F.W., *“Power Generation, Operation, and Control”*, A Wiley-Interscience Publication. New York, 1984.
- [3] Hadhi, Benny., “Optimisasi Unit Commitment Mempertimbangkan Fungsi Biaya Tidak Mulus dengan Firefly Algorithm”, Pomits, 2014.
- [4] Shabir, Khalikus., “Dynamic Economic Dispatch Menggunakan Firefly Algorithm”, Buku Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2012.
- [5] Lin, Shuang., “Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling Problem Considering Power Flow Constraint”, IEEE Paper, 2015.
- [6] Yang, Xin-She., *“Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms 2nd edition”*, Luniver Press, 2010.
- [7] Zhang, Yao., “Economic Dispatch of Hydrothermal Power System with Large Scale Wind Power Penetration”, IEEE Paper, 2012.
- [8] Singh, Vimal., “Genetic Algorithm Solution for Convect Hydrothermal Generation Scheduling Problem”, IEEE Paper, 2012.
- [9] Ramirez, Juan., “Optimal Operation of Hydrothermal System in The ShortTerm”, IEEE Paper, 2005.
- [10] Gutham, Samudi., “Hydro Thermal Scheduling using Particle Swarm Optimization”, IEEE Paper, 2008.
- [11] Anwar, Ibrahim., “Alaliran Daya Optimal Mempertimbangkan Efek Katup Bahan Bakar di Sistem Jawa Bali 500kV Menggunakan Metode PSO”, Pomits, 2013.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## INDEKS

### A

algoritma, 3, 19, 22, 23, 24

### B

batas, 9, 10, 15, 16, 21, 22,  
23, 53, 54, 55, 60, 61, 62  
batasan, 2, 3, 17, 19, 20, 28,  
29, 48, 49, 50, 52, 53, 54,  
55, 56, 57, 59, 60, 61, 62,  
63

beban, 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12,  
13, 14, 16, 17, 35, 39, 40,  
43, 47

biaya, 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11,  
14, 15, 16, 17, 19, 25, 30,  
33, 41, 48, 53, 54, 55, 60,  
61, 62, 63

### C

cahaya, 23, 24, 25, 30, 31, 33  
constraint, 16, 17, 19, 29, 30  
cost, 9, 14, 15, 16, 19, 20, 29,  
31

### D

dasar, 1, 8, 9, 10, 23, 24, 36,  
43  
data, 10, 19, 25, 48  
daya, 1, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 12,  
14, 15, 16, 17, 20, 24, 25,  
28, 29, 31, 33, 36, 38, 39,  
44, 46, 47, 53, 54, 55, 60,  
61, 62, 63  
distribusi, 5, 7, 8, 24

### E

economic dispatch, 3, 15, 16  
efisiensi, 10, 15  
ekonomi, 8, 14  
ekonomis, 1, 2, 6, 10, 14, 30,  
33  
energi, 5, 6, 7, 10, 13, 14, 15,  
16  
error, 50, 51, 57, 58

### F

faktor, 6, 9, 15, 23, 29, 30  
firefly algorithm, 1, 2, 3,  
4, 5, 19, 25, 31, 34, 48, 63  
firefly, 1, 2, 3, 4, 5, 19, 24, 25,  
31, 34, 48, 63  
fitness, 23, 29, 30, 35, 41  
function, 16, 19, 29  
fungsi, 2, 9, 11, 12, 16, 23,  
24, 33

### G

generator, 6, 8, 9, 10, 15, 16,  
17, 25, 36, 44, 63  
genetik, 23

### H

hasil, 1, 2, 3, 24, 30, 31, 34,  
35, 38, 39, 40, 41, 43, 46,  
47, 48, 49, 50, 51, 52, 53,  
54, 55, 56, 57, 58, 59, 60,  
61, 62, 63  
hydroplant, 14

hydrothermal, 1, 2, 3, 4, 5,  
13, 19, 20, 21, 25, 31, 33,  
34, 35, 39, 40, 41, 43, 47,  
48, 63

## I

ieee, 1, 3, 25, 26  
inflow, 29  
intensitas, 23, 24, 30, 31, 33  
interval, 2, 14, 17, 22, 25, 31  
iterasi, 15, 16, 29, 30, 31, 33,  
35, 41

## J

jangka pendek, 1, 5, 19, 25,  
33, 63

## K

kalori, 9  
karakteristik, 3, 7, 8, 9, 10,  
11, 12, 15, 19  
kebutuhan, 1, 9, 14, 16, 40,  
47  
koefisien, 16, 20, 21, 24, 30,  
33  
kondisi, 6, 9, 16, 63  
konsumen, 5, 6, 7  
konvergensi, 24, 31, 35, 41  
koordinasi, 1, 2, 3, 4, 5, 19,  
20, 21, 25, 31, 33, 34, 35,  
38, 39, 40, 41, 44, 47, 48,  
63  
kunang-kunang, 19, 23, 24,  
30, 31  
kurva, 9, 11, 12, 35, 36, 37,  
43, 44, 45

## L

laporan, 3  
listrik, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,  
12, 13, 15, 16  
load balance, 29

## M

maksimum, 2, 9, 16, 17, 19,  
21, 22, 24, 30, 31, 49, 50,  
52, 53, 54, 55, 56, 57, 59,  
60, 61, 62  
matlab, 2, 19, 34  
metode, 2, 3, 5, 15, 16, 25, 63  
minimal, 1, 9, 14  
minimum, 2, 9, 12, 16, 17, 19,  
21, 22, 25, 30, 49, 50, 52,  
53, 54, 55, 56, 57, 59, 60,  
61, 62, 63

## O

objective, 16, 19  
operasi, 1, 2, 4, 14, 16, 19,  
29, 63  
optimal, 1, 14, 16, 19, 29, 30  
optimisasi, 1, 14, 16, 22, 23,  
24

## P

panas, 8, 11, 23  
parameter, 15, 16, 24, 31, 33  
pembangkit, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9,  
10, 11, 12, 14, 15, 16, 17,  
19, 20, 25, 28, 29, 33, 55,  
62, 63  
plant, 8, 14  
pola, 1, 7  
populasi, 23, 24, 28  
pusat, 5, 6

## R

reservoir, 2, 19, 21, 22, 25, 28,  
29, 31, 36, 37, 39, 44, 45,  
46, 50, 52, 57, 59

## S

simulasi, 3, 19, 25, 33, 34, 38,  
39, 40, 41, 46, 47, 48, 49,  
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56,  
57, 58, 59, 60, 61, 62, 63

sistem, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,  
10, 11, 14, 15, 16, 23, 25,  
63

software, 19

solusi, 24, 25, 28, 29, 30, 33

steam, 13, 14

## T

tegangan, 7, 8

tenaga, 1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11,  
12, 14, 15, 16

teori, 3, 5

thermal, 1, 2, 3, 8, 9, 10,  
12, 19, 20, 21, 25, 28, 29,  
31, 33, 36, 39, 40, 41, 43,  
47, 48, 55, 62, 63

transmisi, 5, 6, 7, 8, 63

tugas akhir, 1, 2, 3, 4, 15, 25,  
33, 34

turbin, 6, 8, 9, 11, 36, 44

## U

unit, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11,  
12, 13, 15, 16, 17, 19, 20,  
21, 22, 25, 28, 29, 31, 33,  
36, 37, 38, 39, 40, 41, 43,  
44, 45, 46, 47, 48, 49, 50,  
51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,  
58, 59, 60, 61, 62, 63

## V

volume, 2, 12, 19, 21, 22, 27,  
28, 29, 31, 37, 38, 39, 44,  
45, 46, 52, 59

## W

waktu, 1, 2, 19, 20, 21, 22,  
23, 25, 28, 29

water discharge, 19, 21, 22,  
25, 27, 28, 29, 31, 38, 46,  
50, 57

## RIWAYAT PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Bobby Prayogo. Lahir di Bumi Bung Karno, Jumat, 25 Ramadhan 1413H. Penulis seorang pria perpaduan antara sanguinis dan koleris. Memiliki kepribadian yang humoris walau terkadang tidak lucu, penuh semangat, serta penuh rasa ingin tahu. Dalam pekerjaan penulis tergolong kreatif dan inovatif, berorientasi pada hasil dan target, melihat gambaran secara menyeluruh, mencari pemecahan praktis, bergerak cepat dalam bekerja, mau menjadi sukarelawan, dan berkembang karena proses bersaing. Sebagai seorang teman penulis mudah bergaul, mencintai orang lain, suka dipuji, dan menyenangkan. Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail, [bobby.prayogo14@mhs.ee.its.ac.id](mailto:bobby.prayogo14@mhs.ee.its.ac.id)